

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Aplikovaná geologie

Specializace: Užitá geofyzika



Bc. Josef Buneš

**GEOFYZIKÁLNÍ PRŮZKUM OKOLÍ KOSTELA STĚTÍ SV. JANA KŘTITELE
V DOLNÍCH CHABRECH**

**GEOPHYSICAL SURVEY IN VICINITY OF THE CHURCH STĚTÍ SV. JANA KŘTITELE
IN DOLNÍ CHABRY**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: PhDr. RNDr. Jiří Dohnal

Praha 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 15.6.2020

.....

Bc. Josef Buneš

Poděkování

Děkuji za cenné rady vedoucímu práce, panu RNDr., PhDr. Jiřímu Dohnalovi.

Panu PhDr. M. Trymlovi z Národního památkového ústavu děkuji za nabídku se tímto tématem zabývat a za poskytnutí podkladů.

Zaměstnancům a studentům Přf UK děkuji za pomoc při terénních pracích.

Zároveň děkuji své přítelkyni, rodičům a kolegům za podporu v průběhu studia.

Abstrakt

Diplomová práce „Geofyzikální průzkum okolí kostela Stětí svatého Jana Křtitele v Dolních Chabrech“ popisuje uskutečněné geofyzikální měření na významné archeologické lokalitě a interpretuje jeho výsledky. Lokalita je v práci přiblížena z hlediska historického, geografického a geologického. Popsány jsou fyzikální vlastnosti hornin, základní principy použitých geofyzikálních metod a samotná metodika terénních prací a zpracování dat. V závěru práce jsou výsledky měření interpretovány. Pro průzkum byly využity metody: symetrické odporové profilování, dipólové elektromagnetické profilování, elektrická odporová tomografie a refrakční seismika. Na lokalitě bylo identifikováno a lokalizováno několik anomálií odpovídajících již známým objektům, další část zachycených anomálií odpovídá dosud neznámým pohřbeným archeologickým objektům.

Klíčová slova: archeologie, geofyzika, archeogeofyzika, Dolní Chabry, Kostel Stětí svatého Jana Křtitele

Abstract

The diploma thesis „Geophysical survey of the surroundings of the Church of the Beheading of St. John the Baptist in Dolní Chabry“ describes the realized geophysical measurements at an important archaeological locality and interprets its results. The locality is approached from the historical, geographical and geological point of view. There are described physical properties of rocks, basic principles of geophysical methods used and methodology of field work and data processing. Finally, the measurement results are interpreted. The following methods were used for the research: symmetric resistivity profiling, dipole electromagnetic profiling, electrical resistivity tomography and seismic refraction. Several anomalies corresponding to already known objects were identified and localized in the locality, another part of captured anomalies corresponds to previously unknown buried archaeological objects.

Keywords: archeology, geophysics, archeogeophysics, Dolní Chabry, Church of the Beheading of St. John the Baptist

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Lokalita	2
2.1.	Historie a popis lokality	2
2.2.	Morfologie.....	2
2.3.	Geologie	3
3.	Archeologický průzkum předcházející geofyzikálnímu.....	5
4.	Geofyzika a archeologie.....	6
5.	Geofyzikální průzkum.....	9
5.1.	Volba metod průzkumu.....	9
5.2.	Princip geofyzikálních metod.....	11
5.2.1.	Odporové profilování (OP)	11
5.2.2.	Elektrická odporová tomografie (ERT).....	12
5.2.3.	Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP).....	13
5.2.4.	Refrakční seismika.....	14
6.	Metodika terénních prací.....	16
6.1.	Charakteristika vytyčené plochy.....	17
6.2.	Geodetické práce	18
6.3.	Odporové profilování.....	18
6.4.	Dipólové elektromagnetické profilování.....	18
6.5.	Elektrická odporová tomografie	19
6.6.	Refrakční seismika.....	19
7.	Zpracování naměřených dat	19
7.1.	Symetrické odporové profilování	19
7.2.	Dipólové elektromagnetické profilování.....	20
7.3.	Elektrická odporová tomografie	21
7.4.	Refrakční seismika.....	22
8.	Interpretace výsledků měření.....	23
8.1.	Symetrické odporové profilování	23

8.2.	Dipólové elektromagnetické profilování.....	24
8.3.	Odporová tomografie	28
8.4.	Seismický průzkum.....	28
9.	Souhrn výsledků a diskuze	32
10.	Závěr	34
11.	Seznam použitých zdrojů	35
12.	Přílohy.....	39

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vrstevnicový plán kostelního návrší s půdorysem kostela a ohradní zdi, červeně vyznačena poloha odhalené skalní stěny (Data geoportalpraha.cz, zpracování autor)	3
Obrázek 2: Výřez geologické mapy území Dolních Chaběr s vyznačenou polohou kostela Stětí sv. Jana Křtitele. (Zdroj: ČGS, upraveno).....	4
Obrázek 3: Inženýrskogeologická mapa mocností kvartérního pokryvu s vyznačenými vybranými vrty z tabulky 1 (Zdroj: ČGS, Štorek, 1993, upraveno)	5
Obrázek 4: Situace sond okolo ohradní zdi se zvýrazněným příkopem a jeho osou (Zdroj NPÚ, upraveno autorem)	6
Obrázek 5: Uspořádání elektrod pro 2-D elektrický průzkum, sled měření a schéma pozic naměřených hodnot použitých k vytvoření pseudořezu (Převzato: Loke, 2018)	13
Obrázek 6: Primární a sekundární magnetické pole v metodě DEMP (převzato a upraveno: Milsom, 2003)	14
Obrázek 7: Znázornění šíření P-vlny a S-vlny prostředím (převzato a upraveno: Musset, Khan, 2000)	15
Obrázek 8: Schéma dráhy přímé a lomené vlny v prostředí s jedním refrakčním rozhraním (převzato a upraveno: Musset, Khan, 2000).....	16
Obrázek 9: Situace profilů s vyznačenými stromy a okapem. (Zdroj: Autor).....	17
Obrázek 10: Příklady souboru dat s několika chybami (červené křížky), zobrazeno pomocí funkce "exterminate bad data points" (převzato z Loke 2019).....	21
Obrázek 11: Příklad zobrazení a přiřazení hodochron typům seismické vlny v modulu „traveltime analysis“, zeleně hodochrony přímých vln, modře hodochrony lomených vln (Data: autor)	22
Obrázek 12: Mapa zdánlivých měrných odporů, metoda SOP, hloubka cca 0,75-1,5 m.....	23
Obrázek 13: Mapa zdánlivých měrných odporů, metoda DEMP, hloubka cca 0,5 m	24
Obrázek 14: Mapa složky inphase, hloubka cca 0,5 m	25
Obrázek 15: Mapa zdánlivých měrných odporů, metoda DEMP, hloubka cca 1 m	26
Obrázek 16: Mapa složky inphase, hloubka cca 1 m	26
Obrázek 17: Mapa Zdánlivých měrných odporů, metoda DEMP, hloubka cca 1,8 m	27
Obrázek 18: Mapa složky inphase, hloubka cca 1,8 m	27
Obrázek 19: Odporové řezy, profily E14, E18, E22 a E5	30
Obrázek 20: Výsledky refrakční seismiky a seismické tomografie na profilech S23, S25 a S28	31
Obrázek 21: Schéma anomálií spojených metod s idealizovanými obrysy pohřbených objektů a archeologických sond.....	33

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vybrané atributy zdokumentovaných vrtů, nejbližší zájmové oblasti (Zdroj: ČGS)	5
Tabulka 2: Použitelnost geofyzikálních metod pro vyhledávání archeologických objektů (převzato a upraveno David, Linford a Linford 2008).....	8
Tabulka 3: Klíč k tabulce 2 (převzato a upraveno David, Linford a Linford 2008)	9
Tabulka 4: Vybrané fyzikální parametry hornin (převzato a upraveno: Mareš a kol. (1990);Bourbié (1987)).....	10
Tabulka 5: Statistické parametry – SOP	20
Tabulka 6: Statistické parametry – DEMP.....	20

Seznam příloh

Příloha 1: Polohová situace kostela C) a obce B) v Praze A) (Zdroj: http://mapy.cz).....	39
Příloha 2: Inženýrskogeologická mapa geologických útvarů 1:5000 s legendou (Zdroj Štorek D. 1993, upraveno)	40
Příloha 3: Negativy označené III 7, VIII 7, VI 3, VII 1 a v_3_1_109 archeologických sond, zdroj: PhDr. Michal Tryml, odbor archeologie NPÚ v Praze.	41
Příloha 4: Archeologická sonda XX s přepisem popisu – východní profil. Zdroj PhDr. Michal Tryml, odbor archeologie NPÚ v Praze.	42
Příloha 5: Archeologická sonda XXV s přepisem popisu – profil 1 (západní).....	42
Příloha 6: Archeologická sonda XXII s přepisem terénního popisu – řezy v sondě.. Zdroj PhDr. Michal Tryml, odbor archeologie NPÚ v Praze.	43
Příloha 7: Porovnání leteckých snímků z roku 1945 a roku 2019, zdroj: Archiv leteckých snímků (Zdroj: Geoportal hl. m. Prahy, 2020)	43
Příloha 8: Mapa reziduálních relativních odporů, v odpovídajících hloubkách, metoda DEMP. 20x převýšeno.	44
Příloha 9: Metoda ERT, naměřená data (nahore) a 2D invertovaný řez odporový (dole), profil E14...44	
Příloha 10 Metoda ERT, naměřená data (nahore) a 2D invertovaný odporový řez (dole), profil E18 ..45	
Příloha 11 Metoda ERT, naměřená data (nahore) a 2D invertovaný odporový řez (dole), profil E22 ..45	
Příloha 12: Metoda ERT, naměřená data (nahore) a 2D invertovaný odporový řez (dole), profil E5 ...46	

1. Úvod

Tématem diplomové práce je geofyzikální průzkum archeologicky významné lokality kostelního návrší okolo kostela Stětí svatého Jana Křtitele v Dolních Chabrech. Konkrétně se jedná o jihozápadní a jižní část kolem ohradní zdi. Diplomová práce vznikla ve spolupráci s panem PhDr. M. Trymlem z odboru archeologie Národního památkového ústavu (NPÚ) v Praze.

V současnosti je geofyzikální průzkum téměř nedílnou součástí archeologie. K jeho základním výhodám patří nedestruktivní charakter a rychlá realizace bez nutnosti archeologické sondáže. Geofyzikální průzkum poskytuje informace nejen o poloze zaniklých objektů, ale často umožňuje i jejich bližší charakterizaci. Tyto důvody předurčují geofyzikální průzkum k pozici nedocenitelného pomocníka, zvláště v předpřípravných fázích výkopových prací. V některých případech může sloužit i samostatně, a to pro archeologickou interpretaci v místech, kde není možné archeologický průzkum formou výkopových prací uskutečnit. Měřítka geofyzikálního průzkumu, využíteho v archeologii, začínají na mikroúrovni (vyhledávání nejmenších předmětů historického významu, kterými mohou být například nástroje či zbraně), pokračují středními měřítky (např. vyhledávání zaniklých zdí a příkopů) a končí velkými měřítky na makroúrovni (např. průzkumy sídelních oblastí nebo komunikační sítě).

Zájmový prostor této práce tvořila archeology vymezená oblast lokality, kde byly v minulosti realizovány archeologické sondy s nálezy pohřbených objektů. Tyto „historické“ sondy jsou však v současnosti zavezené a pouze u několika z nich je známa jejich poloha. Úkolem geofyzikálního průzkumu bylo nejen lokalizovat a charakterizovat již jednou odhalené objekty, ale i další pohřbené objekty, jež se mohou na lokalitě nacházet. Zájmovou hloubkou průzkumu byly první metry. V první fázi bylo uskutečněno plošné měření metodou symetrického odporového profilování a dipólového elektromagnetického profilování. V druhé fázi byla na základě výsledků z první fáze realizována na vybraných profilech elektrická odporová tomografie a refrakční seismika.

Práce je rozčleněna do dvanácti kapitol. První kapitoly se zabývají historickými skutečnostmi, významem místa, morfologií a geologií lokality. V další kapitole je přiblíženo propojení, stručná historie a důležitost geofyzikálního průzkumu v archeologii a následující kapitoly se zabývají vybranými geofyzikálními metodami a jejich popisem. V diplomové práci je charakterizována samotná metodika měření na lokalitě a je specifikováno zpracování získaných informací. Zpracované výstupy jsou interpretovány a závěrem je uveden komentář dosažených výsledků.

2. Lokalita

2.1. Historie a popis lokality

Obec Dolní Chabry se nachází 3 km od pravého břehu Vltavy. Vznikla na dálkové cestě, která vedla na jih k brodu v Holešovicích, případně k Ďáblicím, a na sever směrem k Mělníku a Levému Hradci (Tryml a Ječný, 1977). První písemná zmínka o Chabrech pochází z roku 1092, kdy kníže Konrád I. Brněnský potvrzuje listinou ostrovskému klášteru jeho statky a mezi nimi také Chabry. Dnešní obec Dolní Chabry vznikla v roce 1864 spojením s Horními Chabry; v roce 1968 se pak obec připojila k Praze (Bradová, 2011) viz. Příloha 1.

Současný kostel, nacházející se na jinak nezastavěné vyvýšenině v centru Dolních Chab, byl vystavěn ve třetí čtvrtině 12. století. Později k němu byla přistavěna sakristie a poslední stavební úpravy prodělal po poničení za třicetileté války.

Archeologický průzkum ze 70. let 20. století přidal lokalitě na archeologickém významu, a to objevením třech dalších sakrálních staveb pod základy současného kostela. Nejstarší odhalenou stavbou byla malá dřevěná stavba na kamenné podezdívce; kvůli nedostatku fragmentů bohužel nebylo možné určit stáří této stavby. Z druhého nejstaršího kostela, pocházejícího z 11. století, se dochovala torza základových zdí. Předchůdkyní dnešního kostela byla rotunda z přelomu 11. a 12. století, která je se svým průměrem 12,8 m druhou největší rotundou v Čechách, po svatovítské rotundě na Pražském hradě (Bradová, 2011).

Kostel byl původně farní, o farnosti jsou první písemné zmínky z roku 1352. Fara byla za třicetileté války zničena a o její podobě a umístění nejsou dochovány žádné záznamy.

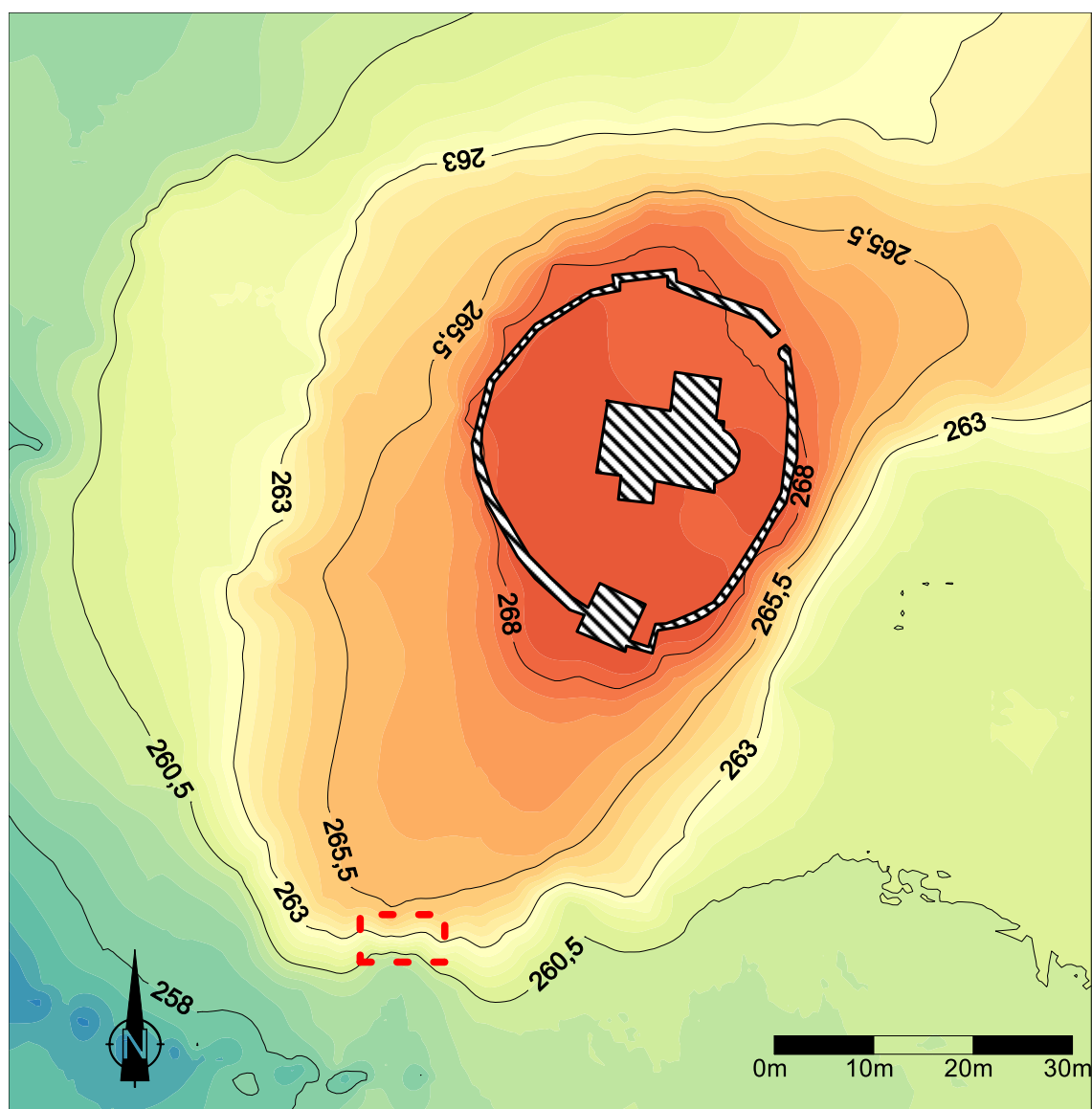
V okolí kostela se dříve pohřbívalo a archeologické sondy zde také několik hrobů odkryly. Ty nejstarší obsahovaly záušnice z 11. století. Hřbitov byl v roce 1905 zrušen a přemístěn na sever obce, v současnosti zde zůstává několik náhrobních kamenů významných chaberských rodin.

Původní plocha, kde se nacházel hřbitov, je obklopena ohradní zdí. V severním cípu je vsazena kovová brána a do jižní části zdi je včleněna samostatně stojící zvonice vystavěná po roce 1500 (Bradová, 2011).

2.2. Morfologie

Samotný kostel se nalézá na pahorku v centrální části obce. Tento pahorek vystupuje uprostřed rozevřeného údolí, jehož osu tvoří Dražanský potok, který teče ve východo-západním směru a ústí do řeky Vltavy. Potok tekoucí pod jižním okrajem vyvýšeniny má niveletu hladiny cca 260 m. n. m., přičemž nejvyšší bod pahorku, nacházející se u dnešní zvonice, je 268,9 m. n. m. Převýšení nad okolní terén je tedy cca 9 m. Znatelné převýšení je také v prostoru jižní části ohradní zdi. Na vnitřní straně ční zeď nad terén cca 1,5 m, z vnější strany pak 2-3 m. Celý pahorek má mírně oválný tvar

s osou ve směru severovýchod-jihozápad. Na severovýchodě se terén pahorku zvedá pomaleji, zatímco na jihozápadě, kde protéká Dražanský potok, je příkrý svah se skalní stěnou cca 5 m vysokou, která vznikla těžbou kamene v novověku, viz. Obrázek 1.



Obrázek 1: Vrstevnicový plán kostelního návrší s půdorysem kostela a ohradní zdi, červeně vyznačena poloha odhalené skalní stěny (Data: Geoportal hl. m. Prahy, 2019, zpracování autor)

2.3. Geologie

Zájmové území i prostor Dolních Chaber spadá do oblasti středočeského Barrandienu a skalní podklad tvoří vesměs proterozoické horniny kralupsko-zbraslavské skupiny. Litologicky se jedná dílem o droby a prachovce (severozápadní část Chaber) a dílem o bazalty, bazaltoandezity a tufy (jihovýchodní část Chaber a pás podél Dražanského potoka). Severně od obce překrývají proterozoikum místy uloženiny české křídové pánve, které reprezentují písčité slínovce, až spongilitické jílovce a místy silicifikované (opuky). Jedná se o sedimenty bělohorského souvrství stáří spodní až střední turon (Kovanda et al., 2001). Kvartérní pokryv pak tvoří především spraše a

sprašové hlíny, dle inženýrskogeologické mapy písčitojílovité hlíny s úlomky křídových a proterozoických hornin s valouny terasových štěrků. Podél potoků jsou vyvinuty nivní a smíšené sedimenty. Lokálně jsou v rámci pokryvu zastoupeny i fluvialní štěrkopísčité uloženiny a navážky.

Samotné kostelní návrší se nalézá na tělese vulkanických hornin, podle mapy se jedná o ovál s délkami os cca 100 x 400 m. Jedná se dle geologické mapy o bazaltoidní horniny a tufy (viz. Obrázek 2), pro porovnání inženýrskogeologická mapa geologický poměrů udává na tomto tělese kvarcdiorit, amfibolický diorit až gabrodiorit a částečně na pahorek zasahující droby, prachovce a zvětralé břidlice viz. Příloha 2.



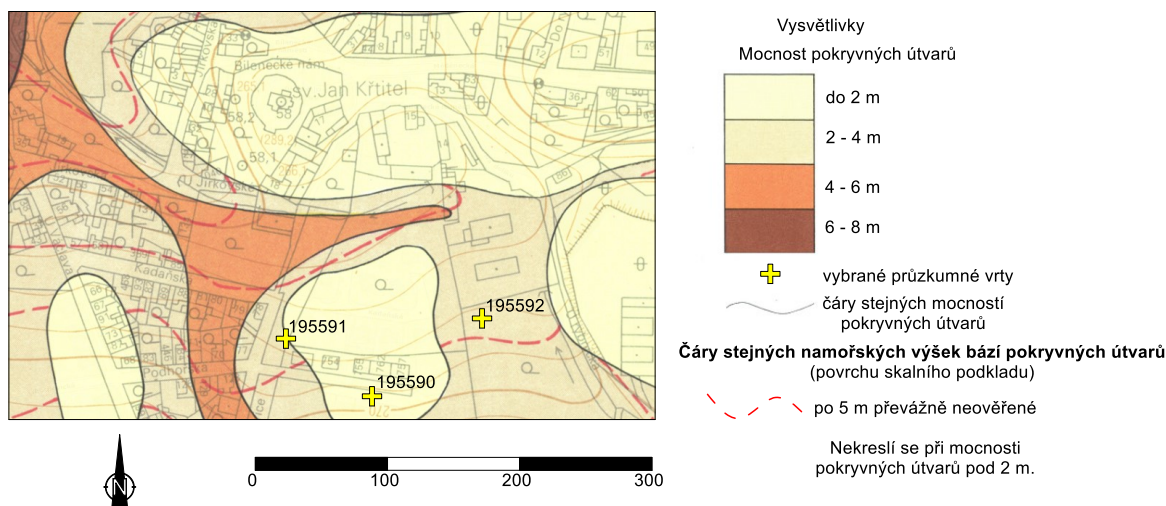
Obrázek 2: Výřez geologické mapy území Dolních Chabí s vyznačenou polohou kostela Stěti sv. Jana Křtitele. (Zdroj: ČGS, 2019, upraveno). Vysvětlivky: (1) navážka, halda, odval, výsypka; (6) nivní sediment; (7) smíšený nepevný sediment; (12) písčito-hlinitý až hlinito-písčitý sediment; (16) spraš, sprašová hlína; (50) písek; (130) štěrky, písčité štěrky, písky s vložkami jílu; (307) písčité slínovce, místy silicifikované (opuky); (748) droby, prachovce; (765) bazalty, andesitbazalty, tufy.

Kvartérní pokryv je tvořen převážně hlinito-kamenitým eluviem. Při archeologickém výzkumu v interiéru kostela byla hornina zachycená ve 2 m hlubokých sondách interpretována jako nepevné eluvium podložních bazaltů, vystavených pedologickým procesům. Kromě archeologických sond je možné litologii kostelního návrší ověřit i na 5 m vysoké skalní stěně (zaniklý malý lom antropogenního původu) nacházející se na jižním cípu pahorku. Horniny tvořící tento výchoz byly popsány jako navětralý, slabě přeměněný diabas či spilit (Kovanda et al., 2001).

V obci se nachází několik starších průzkumných vrtů vyhloubených pro inženýrskogeologické či hydrogeologické účely. Ve většině z nich byla mocnost kvartérního pokryvu v rozmezí 1-3 m, viz. Tabulka 1. Žádný z vrtů, který byl zdokumentován, se nenachází na, nebo poblíž kostelního, vulkanického, pahorku, a nemají pro tento geofyzikálně archeologický průzkum vypovídající hodnotu.

Tabulka 1: Vybrané atributy zdokumentovaných vrtů, nejbližší zájmové oblasti (Zdroj: ČGS, 2020)

ID GDO	Původní název	Druh objektu	Hloubka	Souřadnice X	Souřadnice Y	Nadmořská výška	Zaměření vrtu	Zastižený kvartér
195592	J-11	vrt svislý	5 m	1036567,9	740244,3	266,8	zaměřený	2,9 m
195590	J-6	vrt svislý	5 m	1036624,7	740323,8	269,6	zaměřený	1,1 m
195591	J-9	vrt svislý	4 m	1036582,7	740386,2	265,7	zaměřený	2 m



Obrázek 3: Inženýrskogeologická mapa mocností kvartérního pokryvu s vyznačenými vybranými vrty z tabulky 1 (Zdroj: ČGS, 2020; Štorek, 1993, upraveno)

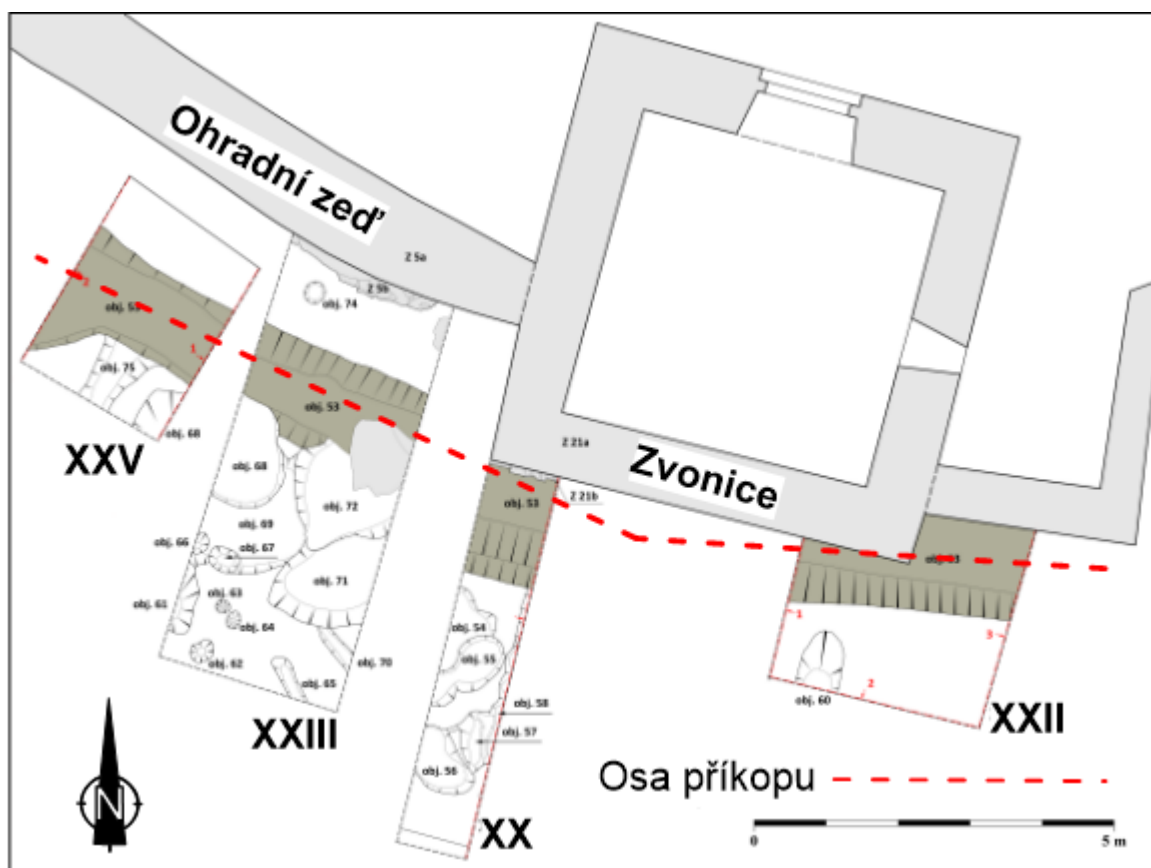
Mocnost pokryvu vně ohradní zdi lze odhadnout ze zaznamenaných profilů archeologických sond vyhloubených u paty zvonice. Podle dokumentace, poskytnuté panem PhDr. M. Trymlem, je mocnost pokryvu nejvyšší v sondě XX nacházející se u paty zvonice (až 1,5 m) a směrem k jihu se po 5 m v sondě snižuje na 0,5 m. Sonda XXV má konstantní mocnost pokryvu 1,5 m a sonda XXII 1 m. Tyto mocnosti zachycené v archeologických sondách odpovídají mocnostem v inženýrskogeologické mapě pokryvu viz. Obrázek 3. V dokumentaci archeologických sond je skalní podklad popsán jako „zelené, zvětralé skalnaté podloží“ (viz.: Příloha 5).

3. Archeologický průzkum předcházející geofyzikálnímu

Na vymezené lokalitě určené ke geofyzikálnímu průzkumu byly dříve provedeny archeologické sondy pod vedením pana PhDr. M. Trymla. Dokumentace k těmto sondám byla při přesunu

kancelářských prostor NPÚ na novou adresu částečně ztracena, zbylá dokumentace byla poskytnuta jako podklady k průzkumu.

Archeologický průzkum se skládal ze čtyř sond podél ohradní zdi a dalších nejspíše tří sond. V sondách podél ohradní zdi byl zachycen první odhalený objekt označený jako příkop, jenž vede podél ohradní zdi a pod jižními rohy zvonice (viz. Obrázek 4). Ve zbylých sondách, nacházejících se západně od již zmíněných sond, byly nalezeny pohřbené zdi, až na sondu, jenž dle popisku sond (Příloha 4) a ústnímu sdělení pana PhDr. M. Trymla navazovala na sondu XX, která je jinak bez jakéhokoli bližšího popisu. Dokumentace k sondám s odhalenými zdi je pouze fotografická, bez popisu a lokalizace (Příloha 3).



Obrázek 4: Situace sond okolo ohradní zdi se zvýrazněným příkopem a jeho osou (Zdroj NPÚ, upraveno autorem)

4. Geofyzika a archeologie

První zdokumentované využití geofyzikálních metod průzkumu v archeologii bylo ve Williamsburgu ve Virginii, USA roku 1938 (Bevan, 2000), v Evropě následováno průzkumem v Dorchestru na Temži, ve Velké Británii roku 1946 (Clark, 1996). Tyto první průzkumy a další jenž následovaly do začátku 80. let, měli převážně experimentální charakter, to se změnilo v 80. letech, převážně ve Velké Británii, z důvodu restrukturalizace praktikování archeologických průzkumů v rámci správy kulturního dědictví. Tato restrukturalizace vedla k přesunutí archeologických vykopávek pod soukromý sektor, došlo k profesionalizaci a rychlejšímu vývoji za účelem snížení cen těchto

vykopávek (Gaffney, Gater, 2003; Lockhart, Green, 2006; Ernenwein, Hargrave, 2009). Po přelomu tisíciletí, kdy došlo k navýšení výpočetních kapacit počítačů, rychlému vývoji, jejich zlevnění a široké dostupnosti se geofyzikální metody v archeologii využívaly stále více. Dalším přínosem, díky tomu, že jsou tyto metody ze své podstaty nedestruktivní, efektivní, relativně rychlé a ekonomické, zvláště v porovnání s plošnými archeologickými vykopávkami, se staly nedílnou součástí archeologie, jak potvrzuje ve svém článku Rashed (2017): „Dnes již téměř není nových archeologických objevů, ve kterých by geofyzikální nástroje nehrály klíčovou roli.“

Provázanost geofyziky s archeologií dokazuje i název mezioborové vědní disciplíny zabývající se využitím geofyziky v archeologii, a to archeogeofyzika.

Geofyzika zkoumá fyzikální pole Země a jejich změny vyvolané nehomogenitami. V případě archeologie jsou tyto nehomogenity způsobené antropogenní činností. Pro její úspěšné využití a správnou interpretaci uvádí Kuna (2004) 11 podmínek, z nichž zde budou uvedeny tři, bez nichž by byly výsledky takového průzkumu neinterpretovatelné. Jsou to:

1. Dostatečná odlišitelnost fyzikálních vlastností objektů od podloží, okolního prostředí či dalších archeologických situací.
2. Dostatečná zachovalost antropogenních objektů a vrstev in-situ.
3. Dostatečné rozměry či množství archeologických objektů, jejich tvar a orientace.

Jednotlivým typovým skupinám archeologických lokalit a objektů nelze jednoznačně přiřadit jedinou nejvhodnější průzkumnou metodu. Vzhledem k charakteru vyhledávaných objektů a jejich uložení je vždy efektivní metody kombinovat. Vhodnou kombinací se pak zvyšuje interpretovatelnost, výsledky jednotlivých metod se vzájemně doplňují a výsledek průzkumu se tak zkvalitňuje.

Následující tabulka (Tabulka 2) s klíčem (Tabulka 3) podle David, Linford a Linford (2008) nabízí pokus o kategorizaci vyhledávaných objektů, k nimž přiřazuje vhodné průzkumné, geofyzikální metody:

Tabulka 2: Použitelnost geofyzikálních metod pro vyhledávání archeologických objektů (převzato a upraveno David, Linford a Linford, 2008)

Archeologický objekt/metoda	Plošná magneto metrie	Odporové metody	GPR	Elektromagnetické metody	Magnetická susceptibilita
Oblasti osídlení	Y	n	N	?	y
Rozptýlení artefakty	Y	Y	N	?	y
Větší jámy (>2 m)	Y	y	Y	?	N
Menší jámy (<2 m)	Y	?	y	N	N
Kruhové úžlabí (prehistorické)	Y	n	N	N	N
Kůlové jámy (>0,5 m)	y	n	y	N	?
Ohniště	Y	N	N	n	?
Pece	Y	N	?	?	N
Pohřbené části domů	Y	y	?	?	?
Základy domů	?	y	n	?	n
Přikopy (<2 m)	Y	y	n	n	n
Velké příkopy (>2 m)	Y	y	?	?	n
Paleo kanály	y	y	Y	y	N
Komunikace	y	y	?	?	N
Výkopy	y	Y	?	N	N
Trámové konstrukce	y	n	?	N	N
Kamenné základy	?	Y	Y	Y	N
Cihlové základy	y	Y	Y	?	N
Dlažba	-	Y	Y	?	N
Pohřbené megality (magnetické)	Y	Y	Y	?	N
Pohřbené megality (nemagnetické)	-	Y	Y	?	N
Kamenné žlaby	n	y	Y	?	N
Dutiny	n	Y	Y	?	N
Hroby	?	y	?	N	N
Místa kremace	n	N	N	N	?
Brázdy	Y	Y	N	n	n
Terasová pole	y	Y	N	n	n

Tabulka 3: Klíč k tabulce 2 (převzato a upraveno David, Linford a Linford, 2008)

Klíč k tabulce 2:	
Y	Metoda dobře reaguje v mnoha podmínkách a je doporučena.
y	Metoda dobře reaguje v mnoha podmínkách, ale je doporučeno ji kombinovat s jinými metodami.
?	Metoda může fungovat za určitých podmínek a její použití může tedy být sporné.
n	Metoda může za určitých podmínek fungovat, ale je doporučeno využití jiných metod.
N	Metoda je pravděpodobně neúčinná, nebo jsou její výsledky nejisté.

Tato tabulka (Tabulka 2) byla sestavena podle zkušeností s používanými geofyzikálními metodami v archeologii ve Velké Británii. Avšak i ostatní metody, jež nejsou v tabulce zmíněny, jsou při archeologickém výzkumu úspěšně využívány. Jako příklady lze uvést mikrogravimetrický průzkum uvnitř kostela Don Church za účelem vyhledání krypty pod jeho podlahou (Padín, Martín a Belém Anquela, 2011), nebo seismického průzkumu (zde konkrétně seismické tomografie) pro charakterizaci vnitřku pohřebních mohyl (Forte, Pipan, 2008).

5. Geofyzikální průzkum

5.1. Volba metod průzkumu

Volba metod vždy závisí na fyzikálních vlastnostech hornin nacházejících se na lokalitě, typu vyhledávaných struktur a požadavcích na detailnost získaných informací.

V tomto případě se jednalo prioritně o dva typy vyhledávaných struktur. Prvním z nich byly pohřbené zdi a jejich základy, které mohou být pozůstatkem zdejší, dnes již zaniklé fary. Druhou hledanou strukturou byl lineární, do podloží zahloubený, objekt, archeology označovaný jako příkop. Tento příkop byl identifikován v archeologických sondách a podle dochované dokumentace měl být hluboký přibližně 0,8 m, široký až 1,2 m a s osou téměř paralelní s ohradní zdi, tzn. probíhající přibližně v západo-východním směru.

Schmidt (2019) rozděluje archeogeofyzikální průzkum podle účelu a získaných informací do třech úrovní:

1. Úroveň: prospekce. Cílem je identifikace oblastí s archeologickým potenciálem a jednotlivých anomálií.
2. Úroveň: vymezení. Průzkum má za úkol vymezit a zmapovat místa s archeologickými strukturami a detailizovat jejich rysy.
3. Úroveň: charakterizace. Průzkum podrobně charakterizuje a analyzuje tvar jednotlivých anomálií.

Podle tohoto rozdělení lze požadavky na informace získané na této lokalitě zařadit do 2. úrovně průzkumu, cílem bylo vyhledání a určení průběhu příkopu a vyhledání pohřbených zdí a přiblížení jejich rozměrů.

Vybrané fyzikální vlastnosti hornin předpokládaných na lokalitě (viz. kapitola 2.3 Geologie) jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 4). V ní jsou uvedeny i fyzikální parametry pískovce a opuky, tedy hornin, které byly použity jako stavební materiál pro stavbu samotného kostela Stětí sv. Jana Křtitele, a je tedy možné, že stejný materiál byl použit i na stavbu vyhledávaných pohřbených zdí, více o použitých stavebních materiálech se zmiňuje například Šídová, 2016. Pro geoelektrické metody je základním parametrem měrný elektrický odpor hornin, resp. i vyhledávaných objektů. Pro seismické metody je klíčový rozdíl rychlostí podélných seismických vln hornin na jejich rozhraní. Protože se lokalita nachází na tělese bazaltoidu, jehož termoremanentní vlastnosti (susceptibilita, magnetizace) mohou, znemožnit efektivní magnetický průzkum (David, Linford a Linford 2008) a protože se vyhledávané objekty nachází v těsné blízkosti ohradní zdi částečně postavené z vypálených cihel, byl magnetický průzkum zavrhnut a z toho důvodu nejsou v následující tabulce magnetické vlastnosti hornin uvedeny.

Tabulka 4: Vybrané fyzikální parametry hornin (převzato a upraveno: Mareš a kol. (1990); Bourbié (1987))

	Měrný odpor [$\Omega \cdot m$]	Rychlost P vln [m/s]
Hlína	1-100	150–600
Bazalt	100–100000	5000–6000
Pískovec	100–10000	1500–4500
Opuka	10–100	1500–4500
Suť, půda	-	300–700
Jílová půda	10–100	300–900

Výše uvedené fyzikální vlastnosti závisí na řadě faktorů, měrný odpor například na porositě, stupni nasycení vodou a koncentraci rozpuštěných solí ve vodou nasycených pórech (Loke, 1999), rychlost seismických vln například na porositě, tlaku, stupni zvětrání nebo výplni pórů (Telford, Geldart, Sheriff, 1990), a je tedy nutné si uvědomit, že reálné hodnoty nemusejí přesně odpovídat hodnotám uvedeným v tabulce, které navíc charakterizuje velké variační rozmezí.

Vzhledem k výše uvedeným informacím o fyzikálních vlastnostech hornin a hledaných objektů na lokalitě a požadavkům na detailnost výsledků, byly vybrány následující čtyři geofyzikální metody:

- Symetrické odporové profilování (SOP) – plošné měření, lokalizace pohřbených zdí, u nichž je očekáván vyšší měrný odpor než v pokryvu.
- Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP) – plošné měření, lokalizace pohřbených zdí a magneticky anomálních objektů.
- Elektrická odporová tomografie (electrical resistivity tomography, ERT) – měření na vybraných profilech, zpřesnění anomálií nalezených metodami SOP a DEMP.

- Refrakční seismika – měření na vybraných profilech, zmapování průběhu podloží, lokalizace příkopu.

5.2. Princip geofyzikálních metod

5.2.1. Odporové profilování (OP)

Odporové profilování patří do geoelektrických stejnosměrných metod. Ve všech stejnosměrných metodách je měřen elektrický potenciál nebo napětí (Mareš, 1990), což následně slouží k výpočtu elektrického odporu. Elektrický proud je do země zaváděn pomocí jednoho páru elektrod (tzv. proudové elektrody) a na druhém páru (tzv. potenční elektrody) je měřen rozdíl potenciálů – napětí.

Z hodnot zavedeného proudu I a změřeného napětí ΔU je spočítán zdánlivý měrný odpor ρ_z podle následujícího vzorce:

$$\rho_z = \frac{k * \Delta U}{I}$$

kde k je konstanta uspořádání, potřebná k výpočtu s použitým uspořádáním elektrod (Milsom, 2003). Konstanta k je dána tímto vztahem:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN}}$$

Kde AM, BM, BN a AN označují vzdálenosti mezi jednotlivými elektrodami (proudové se běžně označují A, B, C, ... a potenční M, N, L, ...). Tento vztah na výpočet ρ_z vychází z Ohmova zákona, který má v diferenciálním tvaru tuto podobu:

$$J = \gamma * E$$

Kde J je hustota proudu, γ je měrná elektrická vodivost (převrácená hodnota měrného elektrického odporu) a E je intenzita elektrického pole.

Takto vypočtený měrný odpor se nazývá zdánlivý, neboť představuje hodnotu změřenou s daným uspořádáním elektrod nad komplexem hornin obecně odporově nehomogenních (Mareš, 1990). Jednotky měrného odporu jsou $\Omega \cdot m$ (ohm na metr). Uspořádáním elektrod je definováno rozmístění elektrod použitých při měření elektrického pole (Mareš, 1990). Volba uspořádání závisí na typu vyhledávaných struktur, jejich uložení, požadovaném hloubkovém dosahu, citlivosti aparatury a úrovni šumu. Uspořádání lze dělit podle charakteru a počtu použitých elektrod na potenciálová, gradientová a dipólová, mezi nejpoužívanější typy lze zařadit uspořádání Wenner, Wenner – Schlumberger, dipól – dipól, nebo pól – pól (Loke, 2018). Hloubkový dosah geoelektrických metod,

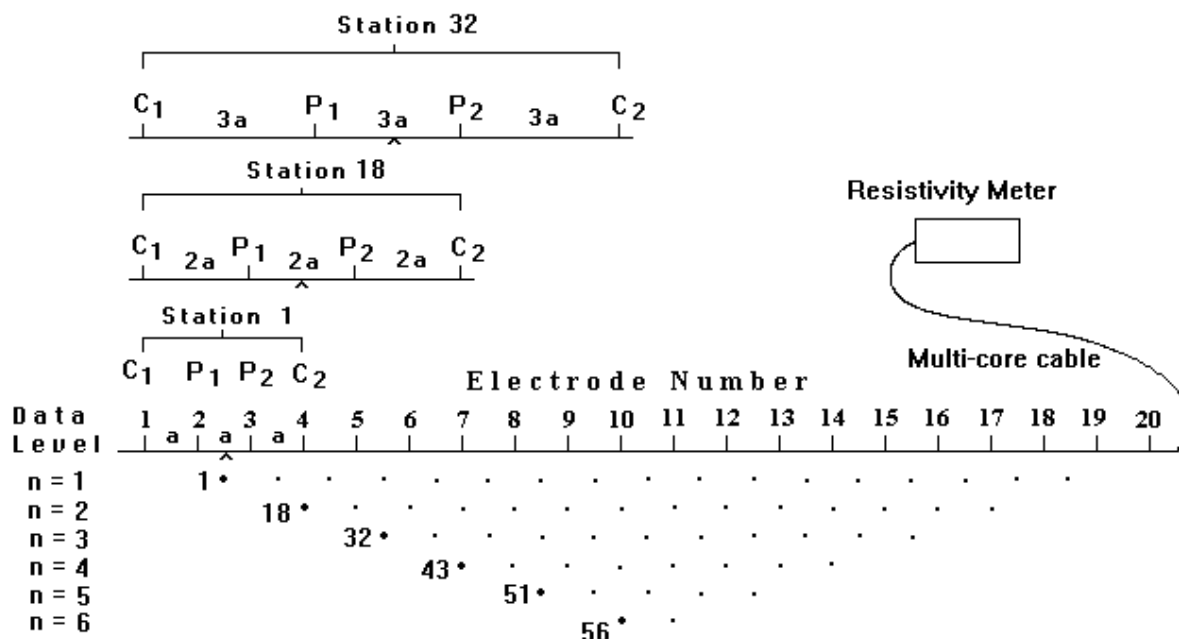
tedy i odporového profilování, je především závislý na vzdálenosti elektrod a zvoleném uspořádání. Hloubkový dosah je pak také ovlivněn samotným odporem hornin.

Odporové profilování znamená, že se pohybujeme po myšlené přímce, profilu, s konstantním uspořádáním elektrod a sledujeme horizontální změny odporu odpovídající přibližně konstantní hloubce.

5.2.2. Elektrická odporová tomografie (ERT)

Metodu ERT si lze představit jako kombinaci odporového profilování a vertikálního elektrického sondování (VES), což je odporové měření na bodě, při němž se zvyšuje vzdálenost mezi proudovými elektrodami, čímž získáváme údaje o odporu v různých hloubkových hladinách. Díky této kombinaci je dosaženo 2D modelu prostředí, na rozdíl od dříve zmíněných metodách OP a VES, které poskytují 1-D model (Loke, 2018). Při metodě ERT se měří s vyšším počtem elektrod, většinou desítky, ale lze použít až stovky elektrod, rozmístěných podél profilu s konstantním rozestupem, vodivě spojených vícežilným kabelem zapojeným do aparatury. Zvolené měřicí uspořádání se volí ve formě předpisů přímo v aparatuře, před zahájením měření, jenž následně sama zajišťuje celý proces přepínání mezi jednotlivými kombinacemi elektrod, dle zvoleného předpisu (viz Obrázek 5), samotné měření a ukládání výsledných dat. Potřebného horizontálního rozlišení lze dosáhnout vhodným rozestupem elektrod, přičemž by vzdálenost pro každé 4 elektrody neměla být vyšší než šířka vyhledávané struktury ve směru profilu (Široký, 2014). Vertikální rozlišení ovlivníme především vhodně zvoleným měřicím uspořádáním a podle požadovaného hloubkového dosahu, dle Loke (2018) platí, že vertikální rozlišení s hloubkou exponenciálně klesá. Pokud vyžadujeme dobré horizontální rozlišení a nevyžadujeme vertikální rozlišení je vhodné použít uspořádání dipól-dipól, nejvyšší hloubkový dosah, pro daný počet elektrod, poskytuje uspořádání pól-pól, ale za cenu nízkého rozlišení, kompromisem mezi požadavkem na horizontální a vertikální rozlišení je uspořádání Wenner – Schlumberger (Loke, 2016; Široký, 2014).

Výsledkem měření metodou ERT je soubor naměřených ρ_z , spočítaných podle vzorce a konstanty uvedených v kapitole 5.2.1, s přiřazenou metráží a hloubkou dle použitého uspořádání. Naměřená ρ_z pak lze inverzí, za pomoci výpočetního softwaru, např. Res2dinv (Geotomo software, 2004) převést na skutečné ρ , a tedy odporový pseudořez na reálný odporový řez.



Obrázek 5: Uspořádání elektrod pro 2-D elektrický průzkum, sled měření a schéma pozic naměřených hodnot použitých k vytvoření pseudořezu (Převzato: Loke, 2018)

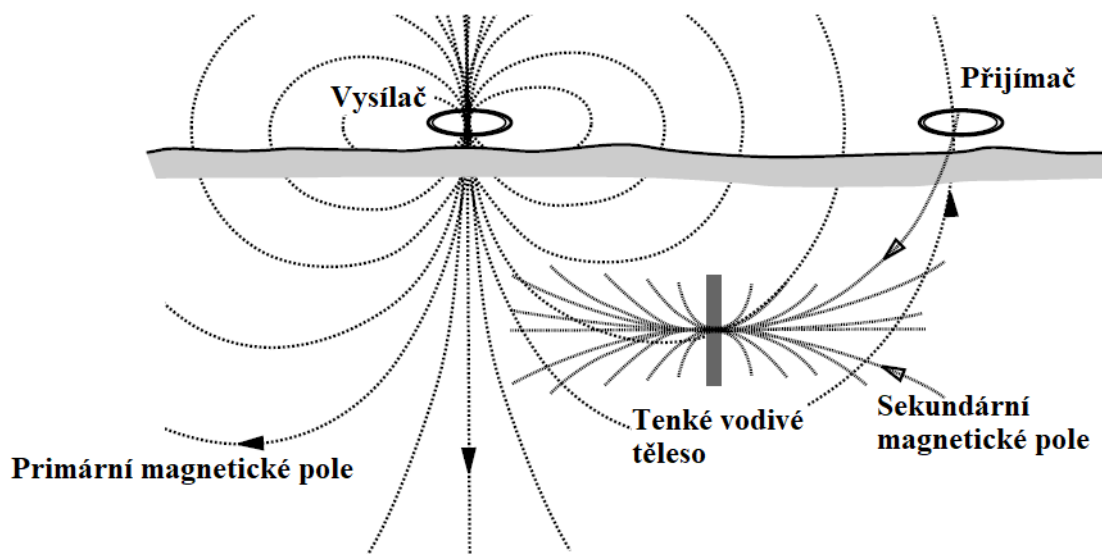
5.2.3. Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP)

Metoda DEMP funguje na principu elektromagnetické indukce, kdy je pomocí střídavého proudu procházejícího vysílací cívkou generováno magnetické pole, toto generované pole se nazývá polem primárním. Primární pole poté v geologickém prostředí generuje ve vodičích vířivé proudy, jenž indukují sekundární magnetické pole, které je zaznamenáváno na cívce přijímací (viz. Obrázek 6).

Jsou zde dvě složky sekundárního magnetického pole, které aparatura zaznamenává, tou první je imaginární složka, někdy nazývaná také jako out-of-phase, tato složka se převádí na zdánlivou měrnou vodivost γ_z , jenž je převrácenou hodnotou ρ_z , vyjádřenou v jednotkách miliSiemens/metr (mS/m). Zhutnění, odstraňování a následné zasypávání jiným materiálem, nebo pohřbené objekty pod povrchem, způsobují odlišné vodivosti oproti pozadí a tím indukují anomální plochy. Vodivost může při měření nabývat i záporných hodnot, i když jsou takové hodnoty fyzikálně bezvýznamné, napomáhají detekci kovových předmětů. Druhou měřenou složkou je tzv. parametr inphase, reálná komponenta, vyjadřující relativní intenzitu synfázní složky elektromagnetického pole, která je značnou mírou stanovena magnetickou susceptibilitou horniny. Parametr inphase je relativní, není kalibrován na přímé měření magnetické susceptibility. Jednotkami složky inphase jsou ppt (parts per thousand – tisícina celku).

Tato metoda je především vhodná k vyhledávání vodivých těles, protože projev malého vodivého tělesa v nevodivém prostředí bude díky indukci vyšší než projev ρ měřený stejnosměrnými metodami

(Milsom, 2003). Složka inphase pak především slouží jako indikátor kovových objektů a umožňuje je lokalizovat a rozlišit od okolí.



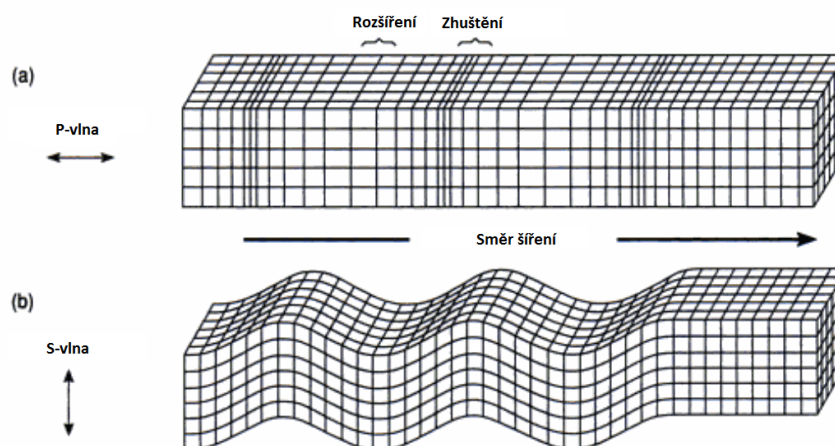
Obrázek 6: Primární a sekundární magnetické pole v metodě DEMP (převzato a upraveno: Milsom, 2003)

Efektivní hloubkový dosah metody závisí na frekvenci magnetického pole, vodivosti prostředí, na orientaci a vzdálenosti vysílací a přijímací cívk. V praxi se pro měření v různých hloubkách používá nejčastěji změna vzdálenosti vysílací a přijímací cívk.

5.2.4. Refrakční seismika

Seismické metody zkoumají horninové prostředí za pomoci šíření mechanické energie, která je buzena většinou kontrolovaně na povrchu terénu mechanickými zdroji, například kladivem nebo výbušninami. Po průchodu mechanické energie (seismické vlny), prostředím se jí část na rozhraní dvou prostředí, o různých vlastnostech, vrací k povrchu, kde je zaznamenány pomocí geofonů.

Mechanická energie, která se šíří prostředím, se dle Everetta (2013) skládá převážně z vln elastických a při seismickém průzkumu předpokládáme takovéto šíření seismické vlny za elastické. Tento předpoklad ovšem neplatí v blízkosti buzení seismických vln, kdy se vzbuzená vlna šíří neelasticky s destrukčními účinky. V dostatečné vzdálenosti od zdroje vlna snižuje svou amplitudu a šíří se elasticky, pro většinu seismického průzkumu tedy může být neelastická zanedbána (Lowrie, 2007, Everett, 2013). Seismické vlny se dělí na řadu typů; pro refrakční seismiku jsou důležité objemové vlny, které se šíří celým objemem horniny. Podle směru kmitání částic, které šíření seismické vlny doprovázejí, se objemové vlny dělí na podélné P-vlny, jež jsou příčinou změn velikosti a objemu a příčné S-vlny jsou spojeny se změnou tvaru. P-vlny kmitají ve směru šíření a S-vlny ve směru kolmém na šíření, podle polarizace vertikálně, nebo horizontálně (viz. Obrázek 7).



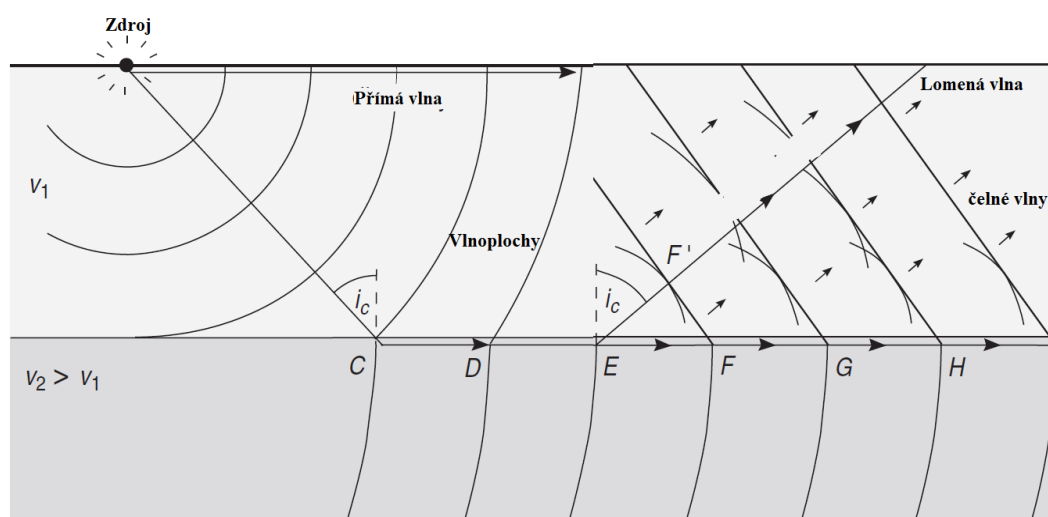
Obrázek 7: Znárodnění šíření P-vlny a S-vlny prostředím (převzato a upraveno: Musset, Khan, 2000)

Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln můžeme, při platnosti Poissonova vztahu $\lambda = \mu$ (Lamého koeficienty), podle Musseta a Khana (2000) vyjádřit takto: $v_s = 0,55 * v_p$. Z tohoto vztahu vyplívá vyšší rychlost P-vln a jejich dřívější příchod na geofon, před S-vlnami, podle čehož také dostaly svůj název, P – primární, respektive S – sekundární vlny. Pomalejší, než objemové vlny jsou vlny povrchové, které vznikají na hranici prostředí. Jsou to vlny Rayleighovy a Loveho. Rayleighovy vlny se šíří podél rozhraní rozdílných prostředí kdy se částice pohybují po retrogradní elipse, Loveho vlny jsou vázány na povrch, podmínkou vzniku je přípovrchová vrstva nízkých rychlostí s hlubšími vrstvami o vyšších rychlostech, pohyb částic Loveho vln je kolmý na směr šíření s horizontální polarizací.

Seismická vlna se šíří ze zdroje všemi směry a její postup je určen vlnoplochou. Chování vlny na seismickém rozhraní, tj. na styku dvou hornin o rozdílné hustotě a rychlosti šíření vln, je popsáno dvěma principy, Fermatovým a Huygensovým. Oba tyto principy jsou platné a ekvivalentní (Lowrie, 2007; Everett, 2013). Fermatův princip říká, že se vlna vždy šíří od zdroje do cíle cestou nejkratšího času, Huygensův princip, popisující chování vlnoploch, pak tvrdí, že každá částice kmitající na vlnoploše je sama zdrojem elementárního vlnění (Lowrie, 2007). Seismická vlna se rozhraní dvou prostředí láme a odráží. Část energie je odražena zpět do prvního prostředí, další část se láme do prostředí druhého a část energie se spotřebuje na přeměnu P-vln a S-vln, z jednoho typu na druhý. Toto chování vlny na rozhraní (lom a odraz) je dáno Snellovým zákonem, odvozeným z Huygensova, respektive Fermatova principu (Musset, Khan, 2000; Lowrie, 2007). Snellův zákon říká, že paprsek dopadající na rozhraní pod úhlem α_1 , od kolmice k rozhraní, v prostředí o rychlosti v_1 , se bude do prostředí o rychlosti v_2 lámat pod úhlem α_2 :

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \frac{\sin \alpha_2}{v_2}$$

Refrakční neboli lomené vlny vznikají na rozhraní, pokud vlna dopadá pod kritickým úhlem i_c , takto dopadající vlna se láme pod úhlem $\alpha_2 = 90^\circ$, od kolmice k rozhraní, a šíří se podél rozhraní pomocí kontaktu vrstev a oscilací hornin, a to rychlostí odpovídající druhé, rychlejší, vrstvě (Musset, Khan, 2000). Vlna takto putující po rozhraní se stává podle Huygensova principu zdrojem elementárního vlnění a tyto vlny pak putují pod kritickým úhlem zpět k povrchu (viz. Obrázek 8) kde je vlnění povrchu jimi způsobené zaznamenáno geofony ve formě seismogramů. Geofon je snímač pohybu založen na elektromagnetické indukci. V geofonu je pružinou přichycena orientovaná cívka (pro záznam P-vln ve vertikálním směru) v magnetickém poli permanentního magnetu, geofon je trnem přichycen do země a při průchodu seismické vlny se pohybuje společně s povrchem. Tento mechanický pohyb se přenáší na cívku, která indukuje napětí na koncích cívky. Při měření jsou geofony propojeny speciálním kabelem do aparatury, seismografu, která přichází signál (indukované napětí) zaznamenává.



Obrázek 8: Schéma dráhy přímé a lomené vlny v prostředí s jedním refrakčním rozhraním (převzato a upraveno: Musset, Khan, 2000)

Při refrakčním průzkumu odečítáme ze získaných seismogramů čas prvního příchodu, tj. čas příchodu přímé nebo lomené vlny na geofon uplynulý od mechanického vzbuzení seismické energie, obvykle v milisekundách [ms]. Přímou vlnou se nazývá vlna putující od zdroje přímo pod povrchem viz. Obrázek 8. Tyto časy se společně s polohou geofonů a místa buzení vynášejí do grafů a slouží k získání informací o hloubkách refrakčních rozhraní a rozložení rychlostí.

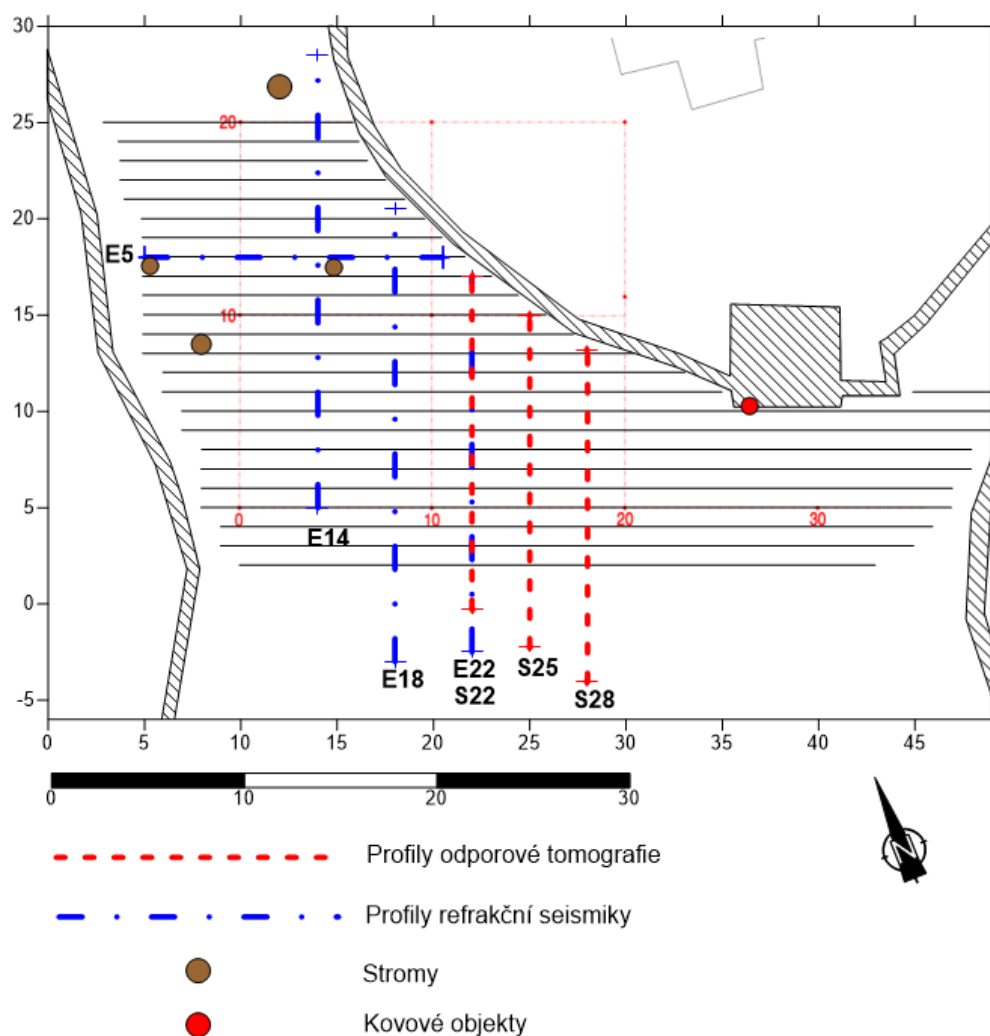
6. Metodika terénních prací

Terénní měření na lokalitě probíhalo ve dvou fázích. V první fázi byla vytyčena síť profilů a bylo realizováno plošné měření odporovým profilováním a dipólovým elektromagnetickým profilováním, tato fáze proběhla v květnu 2018. V druhé fázi bylo realizováno měření na vybraných profilech

metodou ERT a refrakční seismikou, současně byl zaměřen i výškový průběh proměřovaných profilů. Druhá fáze terénních prací proběhla v září 2018.

6.1. Charakteristika vytyčené plochy

Nejvyšší bod vymezené lokality se nacházel u paty zvonice, na profilu 10 s metrží 34 m, od tohoto bodu se terén svažuje k západu, jihu a východu; okraje lokality jsou přibližně o 2 m níže. Směrem na východ je klesání nejprve mírné, po 7 m pak prudké (viz.: Obrázek 1). Na vytyčené ploše se nacházelo několik náletových dřevin a 4 vzrostlé listnaté stromy. Náletové dřeviny byly před vytyčením profilů vysekány, vzrostlé stromy ponechány. V zájmovém prostoru se dle digitální technické mapy Prahy (Geoportal hl. m. Prahy, 2020) nevyskytují žádné „rušivé“ inženýrské sítě, jediným pozorovatelným kovovým objektem nad terénem je okap táhnoucí se po zdi zvonice. Vzhledem k využívání místa jako cíle procházek a pořádání pikniků zde lze nicméně předpokládat výskyt řady drobných kovových předmětů v přípovrchové vrstvě ornice. Obrázek 9 znázorňuje pozice stromů a okapu.



Obrázek 9: Situace profilů s vyznačenými stromy a okapem. Černě profily plošného měření, modře ERT profily, červeně seismické profily a slabě červeně pak body vytyčené geodetem z NPÚ. (Zdroj: Autor)

6.2. Geodetické práce

Zájmová plocha vybraná panem PhDr. M. Trymlem, se nacházela jihozápadně od kostela, vně ohradní zdi, kterou byla ze severovýchodu ohraničena. Geodetem z Národního památkového ústavu (NPÚ) zde bylo vytyčeno 11 bodů, které vytvářely ortogonální síť se základním modulem 10 m. Tři z vytyčených bodů se nacházely uvnitř areálu hřbitova, tj. uvnitř ohradní zdi. Na tyto body byla bezprostředně před vlastním měřením navázána detailní měřičská síť, která pokryla plochu o velikosti zhruba 25 m x 40 m. Tato plocha byla v severovýchodním kvadrantu ohraničena ohradní zdí hřbitova a na západní a východní straně kamennými zídkami vymezujícími přilehlé parcely. Na severu a jihu byla plocha ukončena podle propozic archeologů. Profily v této síti byly vedeny přibližně ve směru V-Z (azimut 115°) s metrážemi rostoucími k východu a s mezi profilovým intervalem 1 m. Profilová měření metodami ERT a refrakční seismikou byla realizována na profilech kolmých na profily základní sítě (tj. ve směru zhruba J-S; s výjimkou profilu E5 proměřeného metodou ERT (viz.: Obrázek 9), ten byl veden ve směru většiny profilů tj. Z - V. Výškový průběh těchto profilů byl změřen s použitím přijímače Trimble R8s s ovladačem Trimble TSC3 a zpracován pomocí integrovaného systému GNSS od společnosti Trimble.

6.3. Odporové profilování

K měření byla použita aparatura Geoter, sestávající se z miliampérmetru a milivoltmetru, a dále pár mosazných potenčních a pár železných proudových elektrod. Odporové profilování proběhlo s Wennerovým uspořádáním elektrod A1M1N1B, lze ho tedy nazývat symetrickým odporovým profilováním (SOP). Hloubkový dosah tohoto uspořádání je v závislosti na konkrétních podmínkách AB/4 až AB/2. V tomto případě s ekvidistanční vzdáleností elektrod 1 m je to tedy 0,75 až 1,5 m. Měřeno bylo s krokem 1 m a změřené hodnoty proudu a napětí byly zaznamenány do polního zápisníku. Celkem bylo změřeno 583 hodnot napětí a stejný počet hodnot proudu.

6.4. Dipólové elektromagnetické profilování

Dipólové elektromagnetické profilování bylo uskutečněno s využitím konduktometru CMD – Mini Explorer od výrobce GF Instruments, s.r.o. Tento konduktometr pracuje na frekvenci 30 kHz (Bonsall, et. al., 2013) a obsahuje cívky v páru vysílač – přijímač v koplánárním uspořádání o vzdálenostech 0,32; 0,71 a 1,18 m. Při měření byly cívky orientovány horizontálně jenž umožňuje efektivní hloubkový dosah přibližně 0,5; 1 a 1,8 m (Short guide for electromagnetivity mapping and tomography, 2016). Měření proběhlo s krokem 1 m; v každé hloubkové úrovni bylo změřeno 647 bodů. S měrnou vodivostí byla měřena i relativní složka inphase. Celkem tedy bylo změřeno 1941 hodnot zdánlivé měrné vodivosti a stejné množství hodnot parametru inphase.

6.5. Elektrická odporová tomografie

Měření metodou ERT proběhlo v druhé fázi po vyhodnocení plošného měření. Byly vybrány 3 základní profily a to: E14, E18 a E22, které byly vedené kolmo na profily plošného měření na metrážích 14, 18 a 22 m. Umístění 4. profilu E5 odpovídá profilu P18 a je tedy kolmý na zbývajících ERT profilech. Všechny tyto profily byly vybrány tak, aby umožnily specifikovat anomálii, resp. její pokračování, zachycenou plošnými metodami. Jednotlivé profily měly různou délku, nejkratším profilem byl profil E5 s délkou 15,5 m, profil E22 byl dlouhý 19,5 m a profily E14 a E18 23,5 m. Měřeno bylo jednokanálovou aparaturou ARES (automatic resistivity system) od společnosti GF Instruments, s.r.o. Elektrody jsou v tomto případě vodivě spojeny s vícežilným kabelem, jenž je připojen k samotné aparatuře. Ke každému segmentu kabelu, tzv. sekci, lze připojit až 8 elektrod a kabely samotné lze spojovat mezi sebou. Napájení aparatury je zajištěno externí baterií. Pro dostatečné rozlišení výstupů při lokalizaci pohřbených zdí byl zvolen krok elektrod 0,5 m, měřeno bylo s uspořádáním elektrod Wenner-Schlumberger, jenž je v aparatuře označeno jako předpis Schlumberger N6. Hloubkový dosah metody je závislý na celkové délce roztažení L a při tomto uspořádání je přibližně $0,192 \cdot L$ (Loke, 2018).

6.6. Refrakční seismika

Seismické měření proběhlo spolu s ERT metodou ve druhé fázi průzkumu. Pro zmapování průběhu podloží a zachycení prodloužení příkopu v jeho očekávané ose byly vybrány 3 profily. Ty byly kolmé na profily plošného měření a byly situovány na metrážích 22, 25 a 28 m. Umístění profilu S22 odpovídá umístění profilu E22. Na každém profilu bylo použito 24 geofonů s krokem 0,75 m, délka celého roztažení tedy byla 17,25 m na každém profilu. K měření byl použit seismograf Geode od firmy Geometrics. Seismograf je ovládán počítačem, ke kterému je připojen standardním síťovým kabelem. Výsledné záznamy jsou ukládány přímo do paměti připojeného počítače. Buzení seismické energie bylo uskutečněno kladivem s krokem 2,25 m se 4 přístřely na každém profilu. Na každém záznamu byly provedeny 2-3 „stacky“. „Stacking“ je proces skládání, nebo sčítání, záznamů dohromady pro zvýšení poměru síly signálu k šumu (Musset, Khan, 2000). Na každém profilu tedy bylo změřeno 13 záznamů, kromě profilu S22, kde nemohl být z nedostatku místa proveden jeden přístřel, tj. celkem 38 záznamů. Poloha přístřelů na severním konci profilů byla za ohradní zdí v prostoru zaniklého hřbitova, kde je terén o cca 0,5 – 1,0 m výše než vně.

7. Zpracování naměřených dat

7.1. Symetrické odporové profilování

Nejprve byly naměřené hodnoty proudu a napětí přepsány do počítače, poté byly spočteny hodnoty ρ_z (viz. kapitola Odporové profilování (OP) 5.2.1). Při terénním zápisu byla měřeným hodnotám přiřazena metráž potenční elektrody M , následně byl tedy zaveden posun na správnou polohu, a to

přičtením 0,5 m, což odpovídá středu použitého uspořádání. Ze souboru změřených hodnot byly vyčísleny vybrané statistické indikátory, umožňující jejich lepší posouzení, viz. Tabulka 5.

Tabulka 5: Statistické parametry – SOP

	$\rho_z(\Omega m)$
minimální hodnota	46,42
maximální hodnota	287,45
medián	93,86
aritmetický průměr	107,31

Z vypočtených hodnot ρ_z byla v programu Surfer 13 (Golden Software, 2016) vytvořena mapa izolinií ρ_z , která byla dále upravovaná jen po vizuální stránce.

7.2. Dipólové elektromagnetické profilování

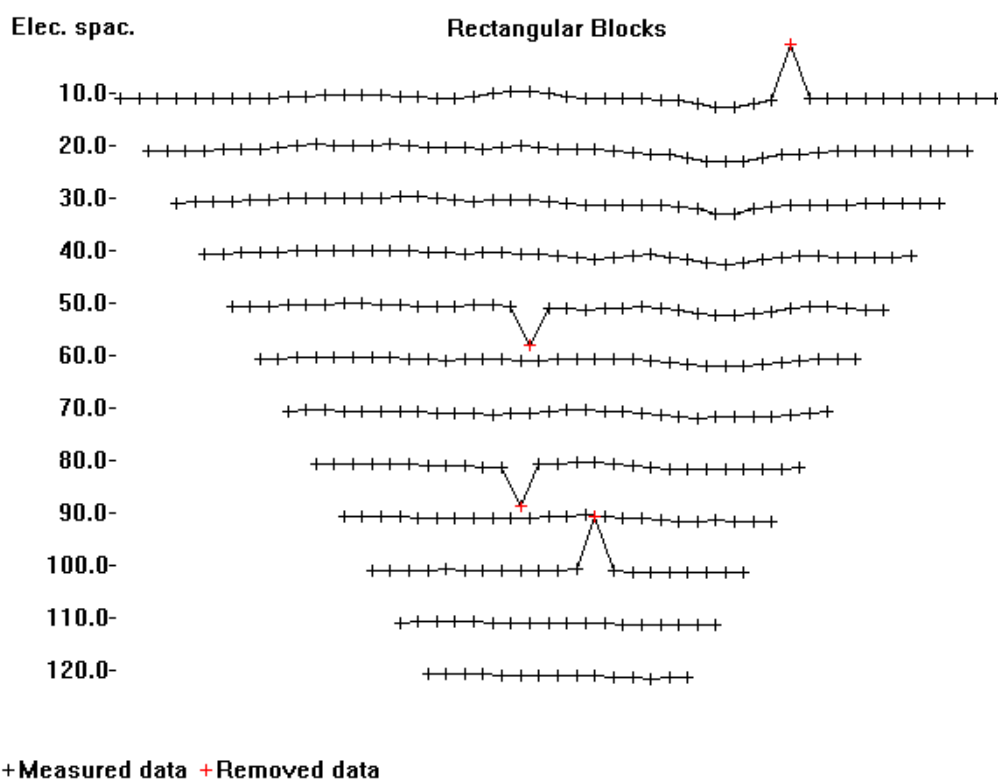
Z naměřených zdánlivých měrných vodivostí byly nejprve spočítány zdánlivé měrné odpory. Podle chyby měření, kterou přístroj počítá a zaznamenává, byly odstraněny ty hodnoty, které měly chybu vyšší jak 10 %. V naměřených datech odporů bylo, zvláště pro nejmenší hloubkový dosah, množství záporných hodnot ρ_z , indikujících recentní kovové předměty, jak bylo předpokládáno. Z dat byly poté v programu Surfer 13 (Golden Software, 2016) vytvořeny mapy izolinií ρ_z . Dalším krokem pro zpřehlednění výstupů bylo odečtení regionálního pole, toho bylo dosaženo vytvořením mapy izolinií regionálního trendu gridovací metodou „Polynomial regression“ 3. stupně. Odečtením hodnot tohoto trendu od původních dat tak vznikl nový soubor dat, z něž bylo možné vytvořit mapy izolinií relativních reziduálních ρ_z . Takto bylo vytvořeno celkem šest map, tři odpovídající jednotlivým hloubkovým úrovním pro původní data a další tři ze souboru dat reziduálních ρ_z . Mapy relativních reziduálních ρ_z nepřinesly požadované zlepšení čitelnosti (viz.: Příloha 8), nebudu se jimi tedy ve zbytku práce zabývat. Dalším výstupem byly mapy izolinií složky inphase, která sloužila pro lokalizaci předmětů s vyšší magnetickou susceptibilitou. Ze souborů hodnot ρ_z byly opět spočteny některé statistické údaje pro jejich lepší charakterizaci, viz. Tabulka 6

Tabulka 6: Statistické parametry – DEMP

	$\rho_{z1}(\Omega m)$	$\rho_{z2}(\Omega m)$	$\rho_{z3}(\Omega m)$	Inp (ppt)	Inp (ppt)	Inp (ppt)
Minimální hodnota	-5882,35	-917,43	-316,47	-42,04	-118,53	-205,31
Maximální hodnota	1639,34	1612,9	314,47	92,33	44,03	60,43
Medián	81,04	84,39	76,05	2,01	2,21	2,19
Aritmetický průměr	72,54	94,85	90,69	2,37	1,65	0,98

7.3. Elektrická odporová tomografie

Změřená data byla stažena do počítače a zkonvertována do formátu DAT pomocí programu na stahování a konvertování dat: ARESII control interface. Další zpracování dat probíhalo v programu Res2dinv (Geotomo Software, 2004). Nejdříve byly opraveny pozice elektrod na jejich skutečné umístění, neboť aparatura ARES neumožňuje při měření zadávat jejich pozice v záporných číslech. Topografie byla přidána přímo do datového souboru podle manuálu Loke (2019) a obdobně byla v datovém souboru provedena diskretizace, rozdělením mode do dvojnásobného množství buněk. Dalším krokem bylo odstranění systematických chybných hodnot funkcí „exterminate bad data points“, hodnoty těchto chybných dat většinou viditelně vyčnívají nad ostatní a dají se tak snadno odstranit, viz. Obrázek 10. V naměřených datech se nevyskytovaly žádné vyčnívající hodnoty, data tak zůstala při počítání inverze kompletní.



Obrázek 10: Příklad souboru dat s několika chybami (červené křížky), zobrazeno pomocí funkce "exterminate bad data points" (Zdroj: Loke, 2019)

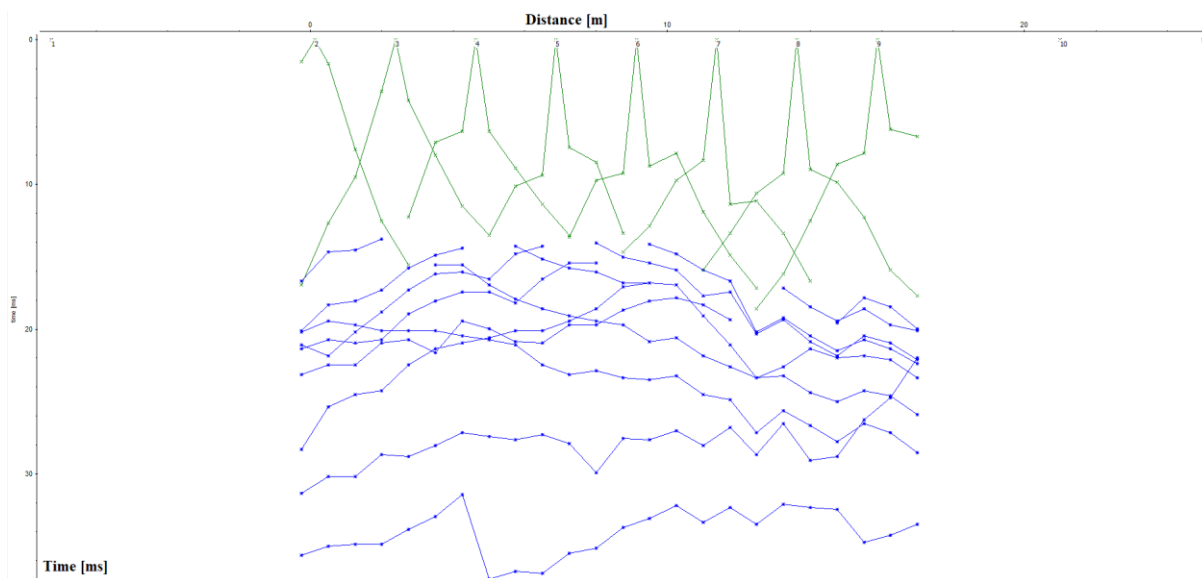
Poté byla provedena inverze metodou nejmenších čtverců s normou I_2 s plnou Gauss-Newtonovou metodou. Výpočet spočívá ve srovnávání modelu hodnot spočítaných zdánlivých měrných odporů (spočítaný pseudořez) z inverzního modelu prostředí (skutečných odporový řez), kdy je v jednotlivých krocích (iteracích) model upravován zvolenou metodou, dokud není dosaženo požadované RMS chyby (root mean square error – střední kvadratická chyba) mezi daty skutečně změřených zdánlivých měrných odporů a spočítaných zdánlivých měrných odporů. Pro grafické výstupy byla použita 7. iterace na profilu E14, s chybou 2,6 %, a 5. iterace na zbylých profilech

s chybami 3,0 % u profilu E5, 1,72 % pro E18 a 1,56 % pro E22. Pro další vizuální úpravy byly vypočítané řezy exportovány a upraveny v programu Surfer 13 (Golden Software, 2016).

7.4. Refrakční seismika

Naměřené seismické záznamy byly staženy a následně importovány do programu Reflex-Win (Sandmeier geophysical research, 2018), ve kterém byl proveden celý zbytek zpracování.

V modulu „2D-dataanalysis“ byla data nejprve při importu zkontrolována, případně opraveny polohy geofonů nebo zdroje na skutečné. Pak byly odečteny časy prvního příchodu vlny, tzv. „picking“. Pro další krok zpracování se odečtené časy na každém záznamu ukládají do formátu PCK a pro vytvoření rychlostního řezu do formátu TOM. Následně byly v modulu „traveltime analysis“ načteny odečtené první příchody, čímž se vynesly hodochrony vln ze záznamů po celém profilu; jednotlivé hodochrony byly rozděleny na jednotlivé typy seismických vln odpovídající seismickým rozhraním. V tomto případě bylo určeno pouze jedno refrakční rozhraní, hodochrony tedy byly přiřazeny buď vlně přímé, nebo vlně lomené (viz. Obrázek 11).



Obrázek 11: *Příklad zobrazení a přiřazení hodochron typům seismické vlny v modulu „traveltime analysis“, zeleně hodochrony přímých vln, modře hodochrony lomených vln (Data: autor)*

Nakonec byla z rozřazených hodochron v modulu „modelling“ vymodelována metodou „wavepath inversion“ seismická rozhraní.

Pro zlepšení interpretačních možností byl navíc u každého profilu sestrojen rychlostní řez seismickou tomografií s využitím startovacích modelů z předchozího kroku. Metoda seismické tomografie spočívá v předpokladu růstu rychlosti s hloubkou a šířením seismických paprsků dráhou nejmenšího času (Fermatův princip, kap. 5.2.4). Prostředí je poté rozděleno na buňky, kterým je každé přiřazena konstantní převrácená hodnota rychlosti - tzv. pomalost S [s/m]. Poté je vytvořen model, jenž je

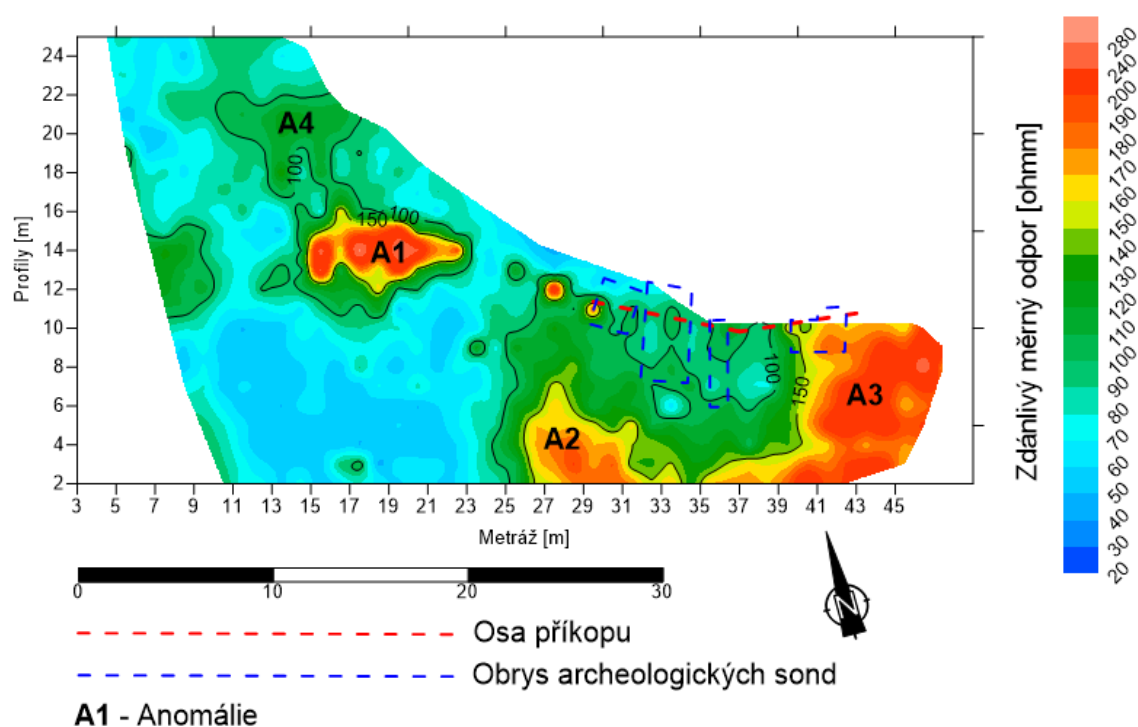
postupně v každé iteraci výpočtu přizpůsobován tak, aby odpovídal nejkratší dráze paprsků a co nejvíce se podobal naměřeným datům (Mokrá, 2016). Postup celého zpracování byl prováděn podle návodu v manuálu od autora softwaru, Dr. K. J. Sandmeiera (2019).

Zhotovené modely a rychlostní řezy byly následně exportovány a přepočítány dle skutečné topografie v programu Excel 2016. Posledním krokem byly vizuální úpravy realizované v programu Surfer 13 (Golden Software, 2016).

8. Interpretace výsledků měření

8.1. Symetrické odporové profilování

Podle výsledků metody SOP se na zájmové ploše nachází několik anomálních oblastí se zvýšenými hodnotami měrných odporů v rozmezí 100-280 $\Omega \cdot m$, viz.: Obrázek 12.



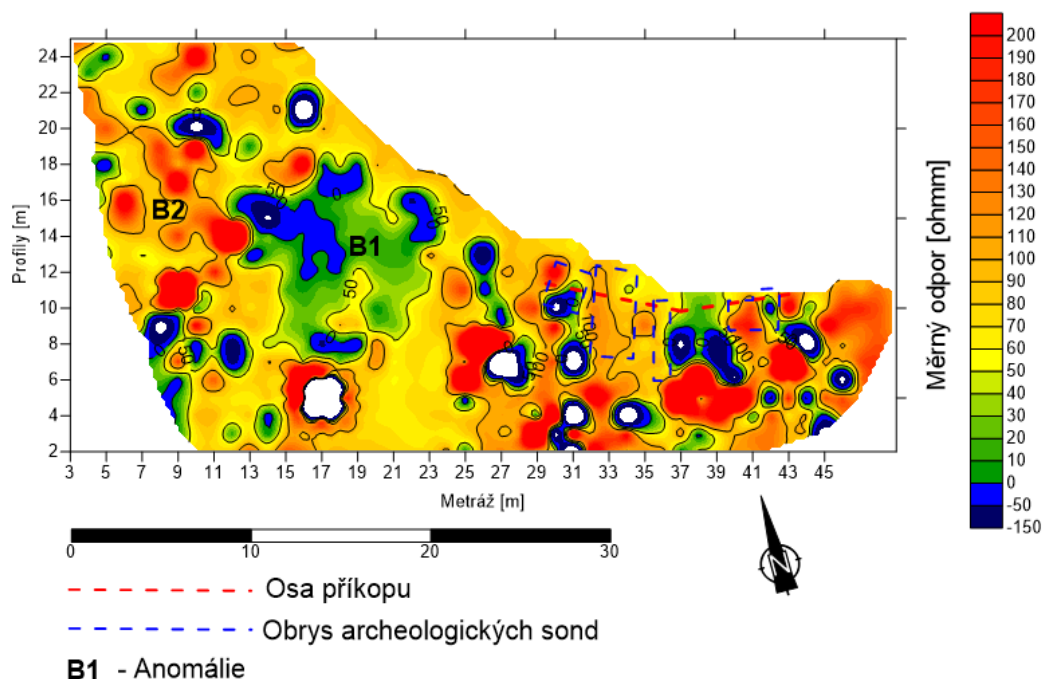
Obrázek 12: Mapa zdánlivých měrných odporů, metoda SOP, hloubka cca 0,75-1,5 m.

Anomálie A2 a A3 tvarem a svými rozměry neodpovídají hledaným objektům a nejspíše se jedná o anomálie způsobené geologií, respektive anomálie způsobené nízkou mocností pokryvu. Naproti tomu anomálie A1 svým tvarem a rozměry přibližně 9x1,5 m odpovídá pohřbené zdi a sutinám z ní, rozptýleném v jejím nejbližším okolí, případně bývalé archeologické sondě vyplněné primárně destrukcí pohřbených kamenných zdí. Severně se nachází anomálie A4, ta je rovnoběžná s anomálií A1 a má podobný tvar, mohlo by se tak jednat o druhou pohřbenou zeď i přes to že její měrné odpory jsou nižší než u anomálie A1.

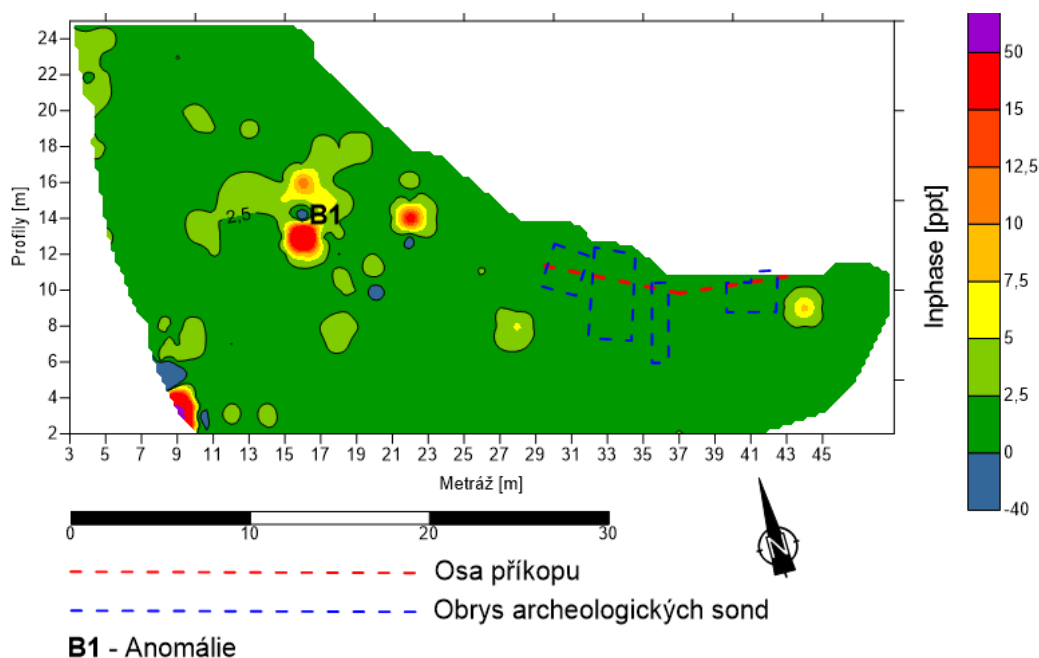
Na místě bývalých archeologických sond v okolí zvonice je lokální snížení měrných odporů, osa příkopu ani jeho pomyslné prodloužení není na mapě izolinií znatelné.

8.2. Dipólové elektromagnetické profilování

V první proměřené hloubce, 0,5 m, bylo množství záporných hodnot bodového charakteru, způsobeného pravděpodobně znečištěním vodivými předměty, viz. Obrázek 13. Ve východní části lokality, od metráže 24, byly naměřeny zvýšené hodnoty měrného odporu, s hodnotami nad 100 $\Omega \cdot m$, bodově pak nad 200 $\Omega \cdot m$. Na místě vysoko odporové anomálie A1 z metody SOP, byla v této hloubkové etáži naměřena naopak nízko odporová anomálie B1 s odpory do 20 $\Omega \cdot m$. Západně, v těsné blízkosti anomálie B1, se nachází podlouhlá, s rozměry přibližně 2x14 m, anomálie označená B2 se zvýšenými odpory. Složka inphase (viz. Obrázek 14) má na lokalitě střední hodnotu 2,01 ppt se zvýšenými hodnotami až 40 ppt na místě anomálie B1. Anomálie B2 se na složce inphase nijak neprojevila.

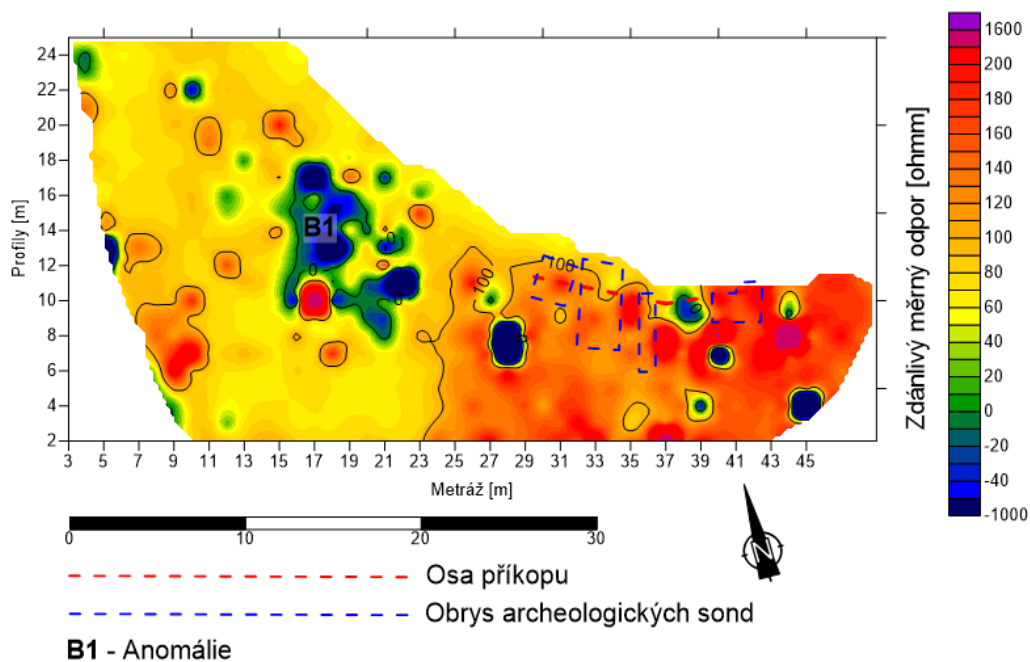


Obrázek 13: Mapa zdánlivých měrných odporů, metoda DEMPE, hloubka cca 0,5 m

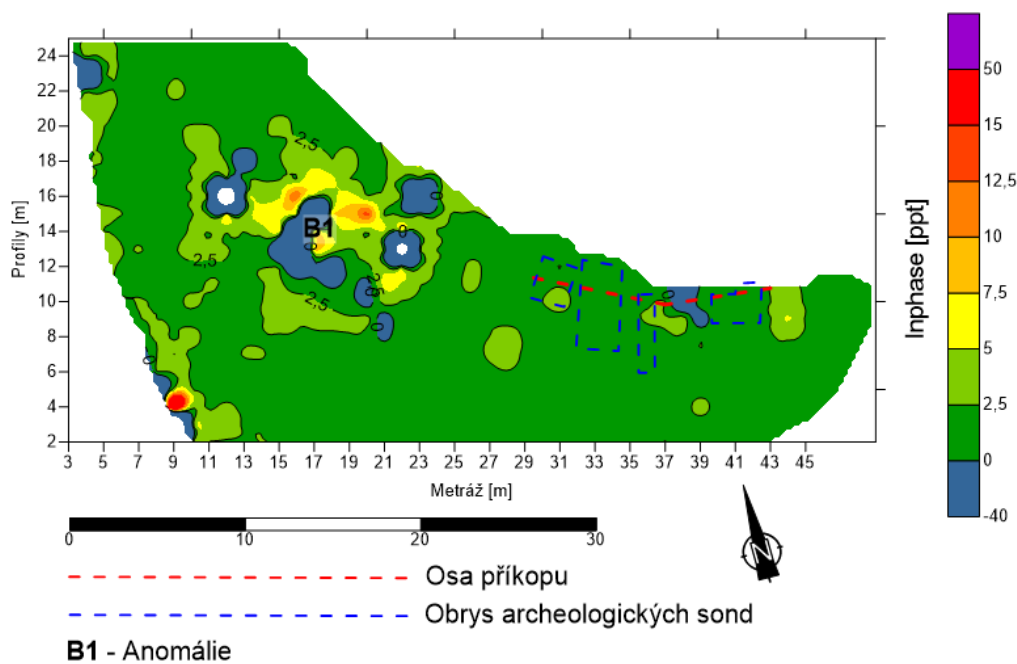


Obrázek 14: Mapa složky inphase, hloubka cca 0,5 m

V proměřené hloubce 1 m již přípovrchové znečištění vodivými předměty čitelnost naměřených dat nenarušovaly (viz. Obrázek 15). Charakter proměřené plochy je stejný jako v hloubce 0,5 m, od metráže 24 je měrný odpor vyšší s hodnotami na $100 \Omega \cdot \text{m}$. Vodivá anomálie B1 se nachází i v této hloubce s vysokými zápornými hodnotami měrného odporu, což znamená přítomnost vodivých, nejspíše kovových předmětů. Složka inphase (viz Obrázek 16) se střední hodnotou 2,21 ppt má na místě anomálie hodnoty maxim do 15 ppt střídající se s minimy až -40 ppt. Tyto střídající se maxima a minima jsou indikátory přítomnosti vodivých předmětů.

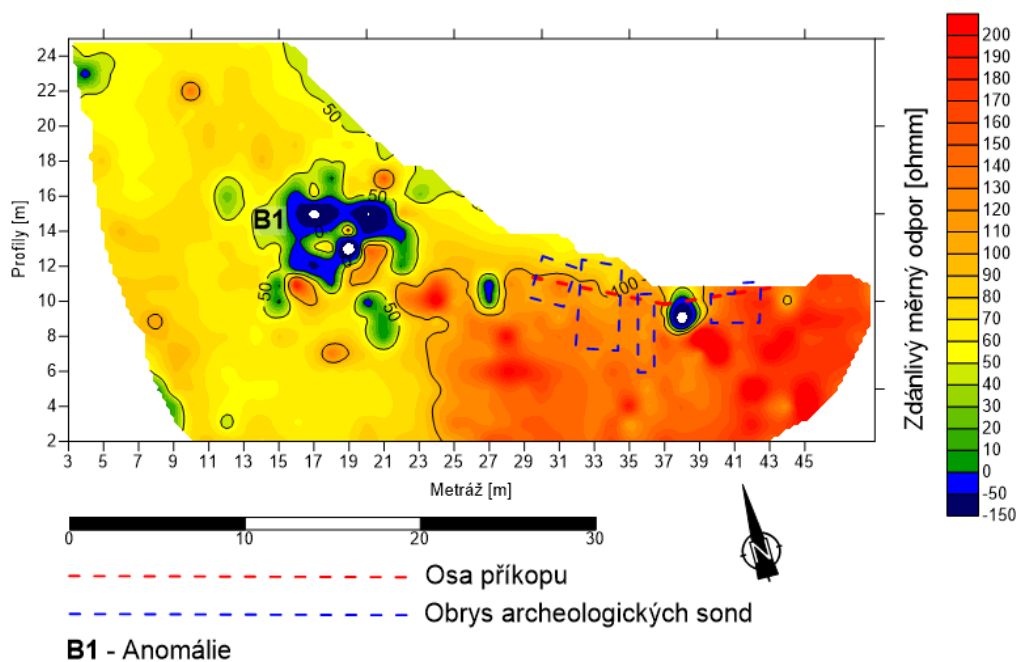


Obrázek 15: Mapa zdánlivých měrných odporů, metoda DEMP, hloubka cca 1 m

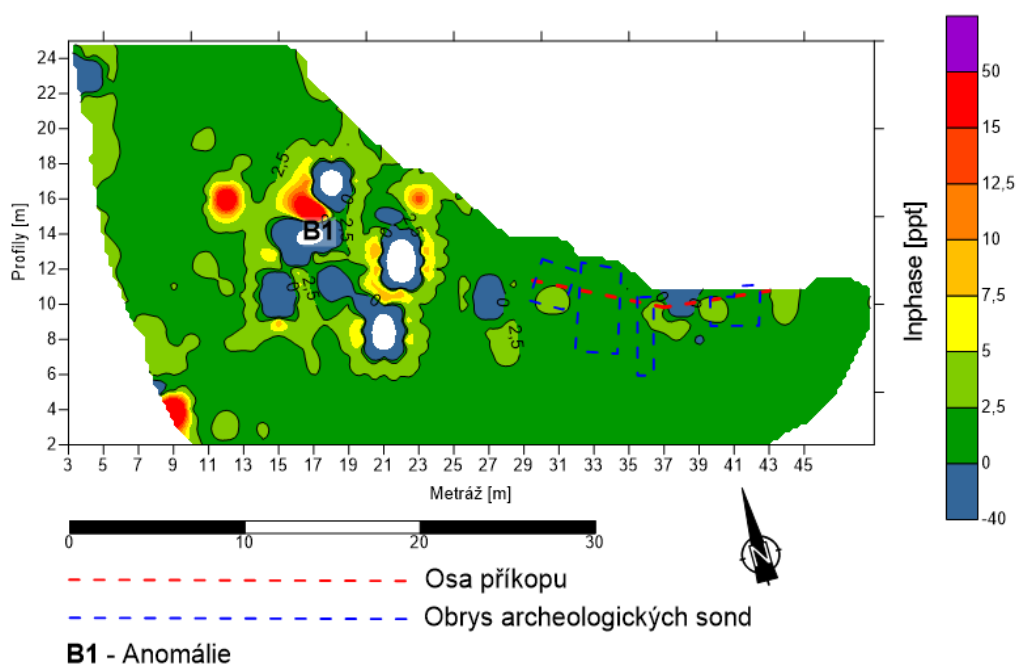


Obrázek 16: Mapa složky inphase, hloubka cca 1 m

V hloubkové etáži 1,8 m jsou naměřené měrné odpory nejhladší, bez bodových anomálií projevujících se v mělčeji proměřených vrstvách. Východně od metráže 24 se odpory zvyšují. Záporná anomálie B1 zaujímá menší plochu se silnějším projevem minim, viz. Obrázek 17. Bodové anomálie zůstávají pouze na profilu 11, metráži 27 a na profilu 10, metráži 38. Naopak anomálie složky inphase jsou v této hladině silnější a zaujímají větší plochu (Obrázek 18).



Obrázek 17: Mapa Zdánlivých měrných odporů, metoda DEMP, hloubka cca 1,8 m



Obrázek 18: Mapa složky inphase, hloubka cca 1,8 m

Výsledky plošného měření DEMP dokládají charakter lokality se zvýšenými měrnými odpory ve východní části, a to ve všech hloubkových etážích. Ve všech hloubkách byla také detekována vodivá anomálie B1, tato anomálie je také patrná na mapách složky inphase množstvím střídajících se maxim a minim. Anomálie se s hloubkou mění tvarově, obsahem plochy však zůstává stejná, na rozdíl od složky inphase, která s hloubkou zaujímá větší plochu a objevuje se vyšší počet bodových

minim. Záporná anomálie na profilu 10, metráži 38, objevující se ve všech hloubkách je způsobena okapovým svodem na zdi zvonice.

8.3. Odporová tomografie

Na lokalitě bylo zjištěno metodou ERT rozmezí měrných odporů od 10 do 1755 Ω . Kvartérní pokryv má velmi nízké měrné odpory, s hodnotami do 50 Ω . Přípovrchová vrstva, do hloubky 0,5 m má odpory zvýšené od 100 do 300 Ω , tyto hodnoty mohou být zvýšené i kvůli delšímu období bez srážek. Na skalní podklad o odporech vyšších než 100 Ω bylo naraženo hlouběji než 3 m, až na profil E22, kde byl skalní podklad v hloubce menší než 2 m, což jako jediné odpovídá inženýrskogeologické mapě mocností kvartérního pokryvu Prahy (Štorek, 1993).

Na všech profilech byly zachyceny anomálie s vyššími odpory od 100 až do naměřeného maxima 1700 $\Omega \cdot m$, hlubší než přípovrchová vrstva se zvýšenými odpory. Anomálie C1, C2 a C3 na profilu C14 jsou hluboké do 1 m, anomálie C4, C5 a C6 sahají hlouběji, do 1,5 m pod povrch a svým jasněji definovaným tvarem indikují pohřbené zdivo. Anomálie C6 je širší s odpory nižšími než ostatní, může se tak jednat o částečně destruovanou zeď.

Anomálie C10 na profilu E5, vedeném ve směru Z–V, je hluboká cca 1 m, může se jednat o částečně zborcenou zeď s materiálem zborceným ze svahu směrem na východ.

Anomálie C7, C9 a C11 na profilech E18, E22 a E5 jsou hluboké 1-1,5 m a široké od 4 do 8 m. Svou velikostí odpovídají archeologickým sondám, které byly dle vysokých odporů až nad 1000 Ω zasypány materiálem skládajícím se z nich vykopaného a částečně sutí.

Anomálie C8 na profilu E22 svými rozměry může odpovídat archeologické sondě, ale svou polohou se nachází mimo oblast, ve které byl, dle sdělení PhDr. M. Trymla, archeologický průzkum prováděn.

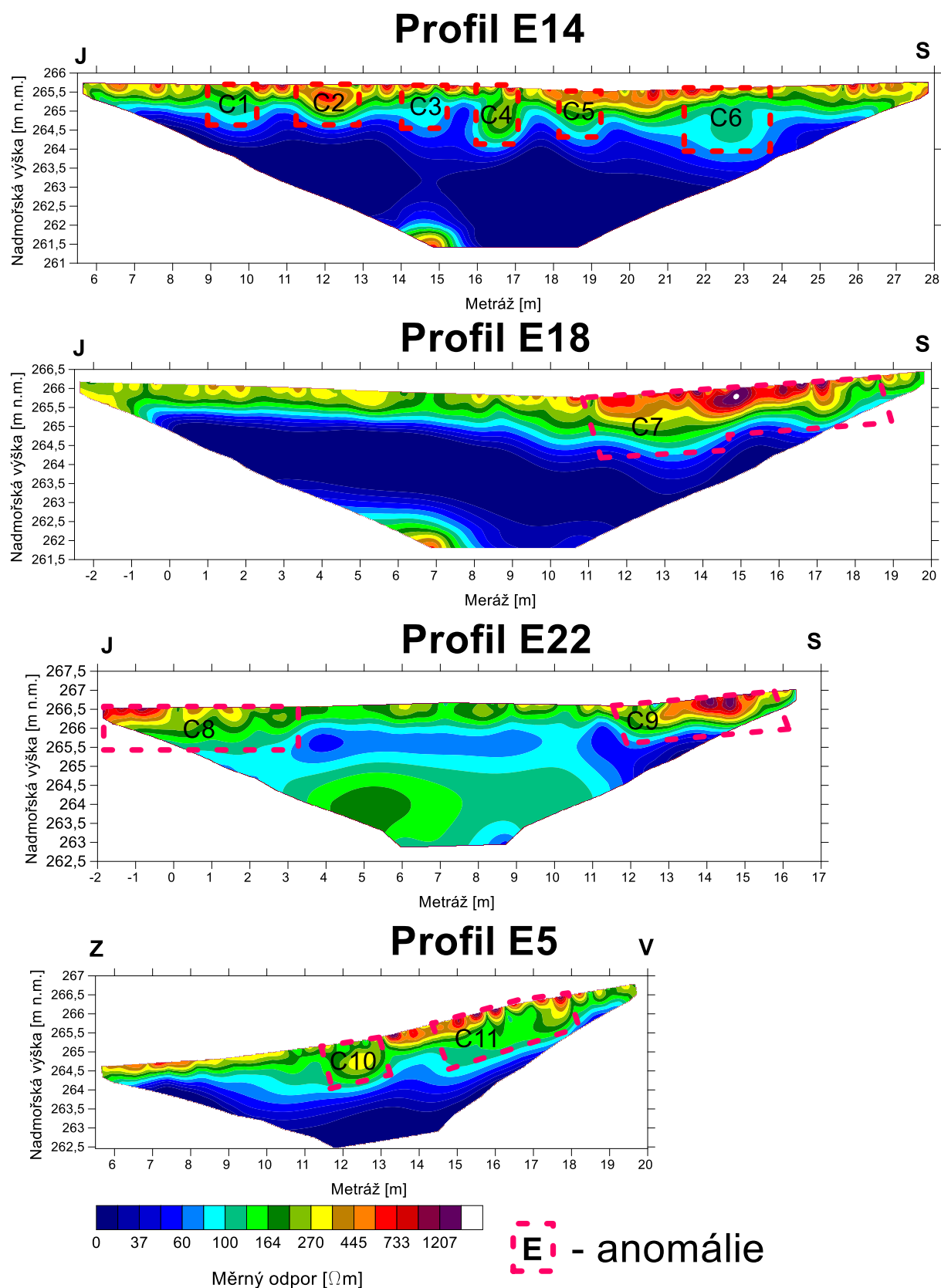
Všechny invertované 2D odporové řezy s topografií a vyznačenými anomáliemi viz. Obrázek 19. Porovnání naměřených dat s invertovanými 2D odporovými řezy viz. Příloha 9-12.

8.4. Seismický průzkum

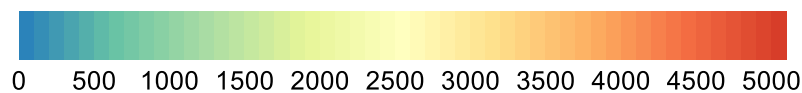
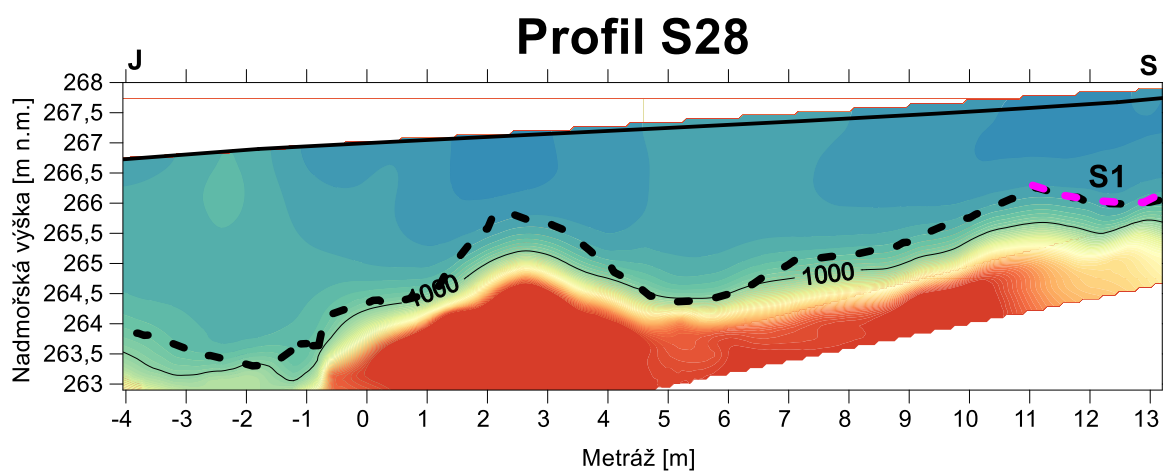
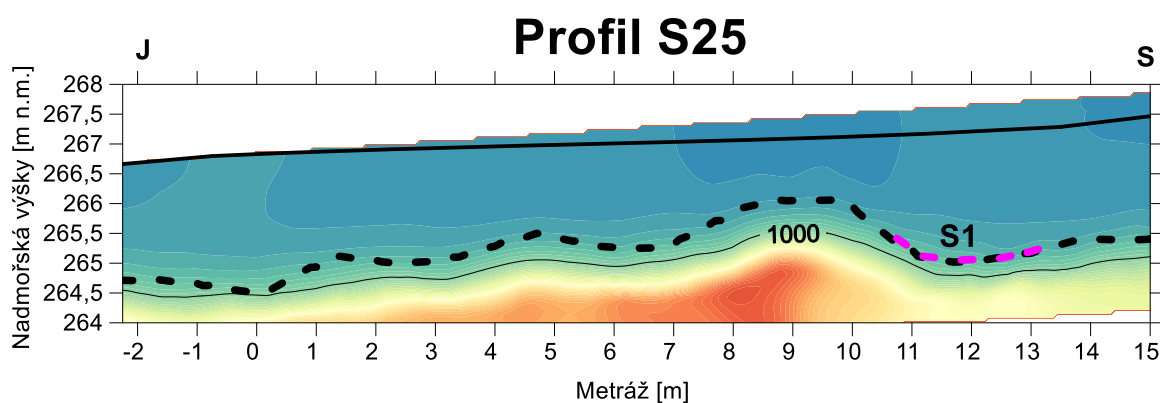
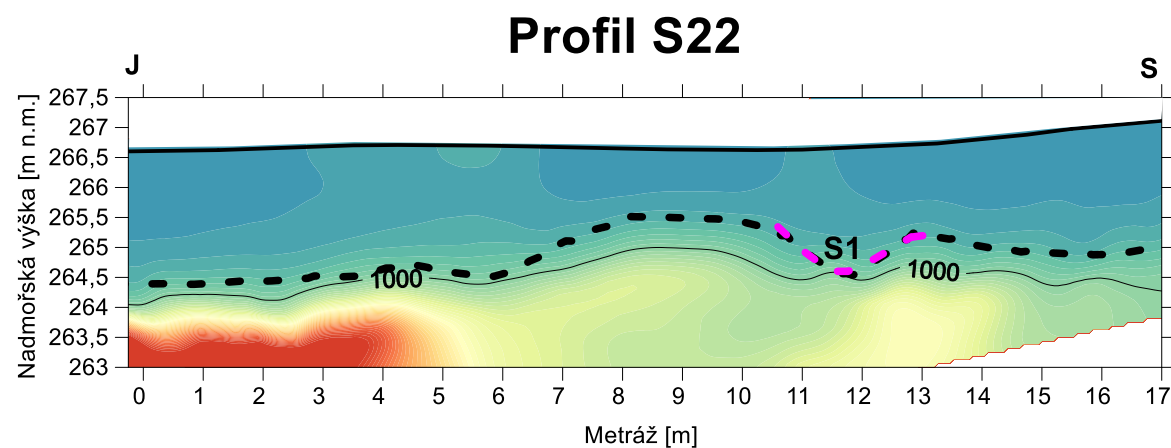
Hloubka refrakčního rozhraní se pohybuje okolo 2 m s nejvyšší do 3 m. Skalní podklad je nejmělkěji uložen v hloubce 1 m na metrážích 8-10 m na profilech S22 a S25, na profilu S28 je pak v hloubce 1,25 na metráži 2-3 m a na metráži 11 m.

Výsledky seismické tomografie vykazují hodnoty rychlosti p-vln 150-500 m/s v pokryvné vrstvě, rychlosti skalního podkladu jsou v rozmezí 1000-5000 m/s, dle rozsahu zvětření.

Na všech třech profilech na metráži 11-13 m se nacházejí úzké deprese, označené **S1** (Obrázek 20), o šířce do 2 m, hluboké přibližně 0,5 m. Tyto deprese svými rozměry a polohou odpovídají pomyslnému prodloužení příkopu z archeologických sond.



Obrázek 19: Odporové řezy, profily E14, E18, E22 a E5



Rychlost p-vln [m/s]

--- Refrakční rozhraní

--- Deprese odpovídající příkopu

Obrázek 20: Výsledky refrakční seismiky a seismické tomografie na profilech S23, S25 a S28

9. Souhrn výsledků a diskuze

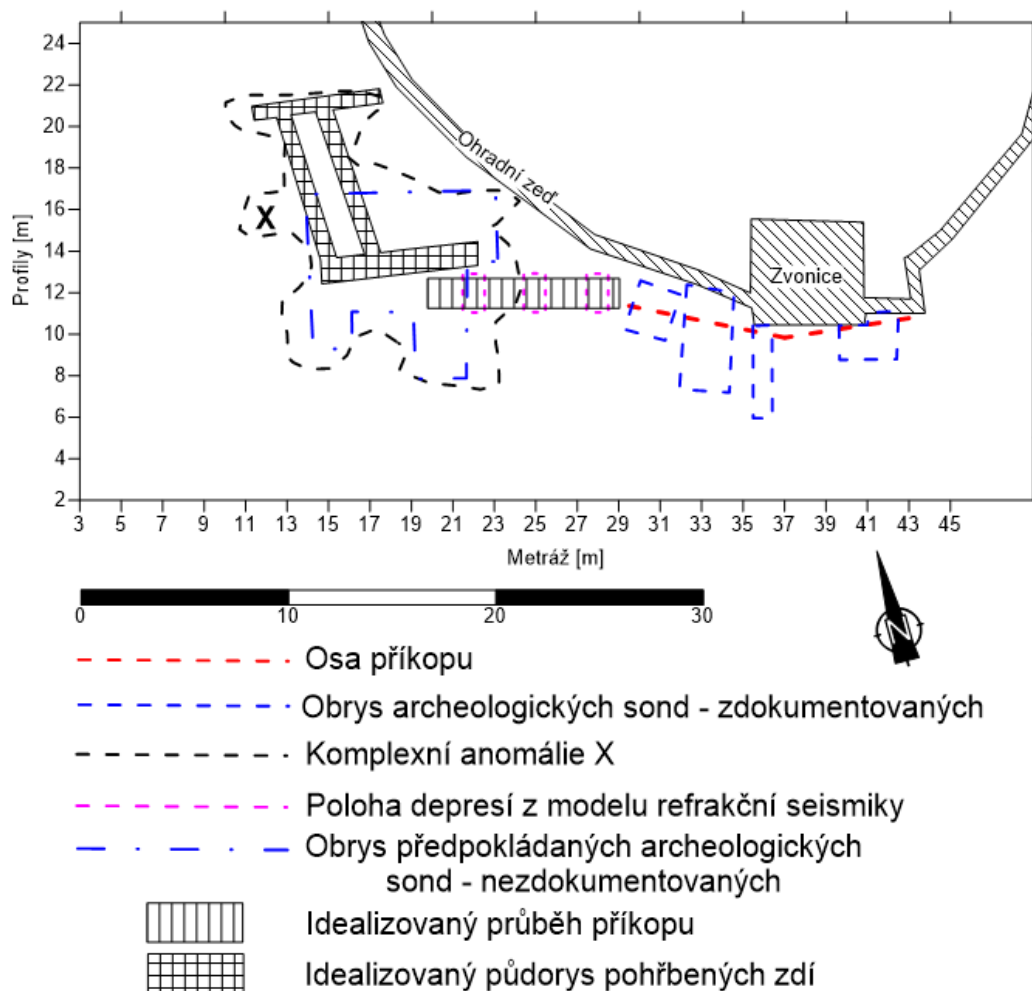
Všechny výsledky jednotlivých geofyzikálních metod spolu navzájem korelují a doplňují se. První přehled o lokalitě přinesla metoda SOP, hlavní anomálií zde je A1, která byla potvrzena anomáliemi C7, C9 a částečně C2 a C3, získaných odporovou tomografií, také anomálie A4 byla odporovou tomografií potvrzena hned několika anomáliemi z odporové tomografie a to C4, C5, C6, C10 a C11. Anomálie A2 je způsobena nižší mocností pokryvu, což je potvrzeno modelem refrakčního rozhraní na profilu S28. Mírně snížené hodnoty měrného odporu u paty zvonice, změřené metodou SOP, nebyly jinou metodou potvrzeny. Tyto částečně snížené hodnoty mohou být způsobeny archeologickými sondami, se kterými se polohově shodují. Anomálie A3 nebyla ověřena žádnou další metodou, zvýšené hodnoty měrného odporu korelují s hodnotami změřenými metodou DEMP a jejich příčina má nejspíše stejné vysvětlení jako anomálie A2 – nižší mocnost pokryvu, což může souviset s prudším svahem vedoucím od paty zvonice směrem na západ. Anomálie A1 polohou koreluje s anomálií B1 lokalizované metodou DEMP, na rozdíl od odporového profilování je tato anomálie charakterizována vysokými měrnými vodivostmi (respektive nízkými, zápornými, měrnými odpory), které jsou způsobeny vodivými, kovovými, objekty, což je potvrzeno i na mapě hodnot parametru inphase. Vodivé anomálie, způsobené těmito objekty, jsou příčinou špatné rozlišitelnosti nevodivých struktur (kamenných zdí) v jejich blízkosti. Pohřbené zdivo tedy lze z metody DEMP na tomto místě interpretovat jen obtížně. Nízké odpory a anomálie hodnoty parametru inphase, ale naopak mohou sloužit jako indikátor polohy zasypaných archeologických sond, do kterých se tyto kovové předměty dostaly nejspíše při jejich likvidaci. Pravděpodobně se jedná o kovové tyče, které sloužily jako opěry vykopaného materiálu dle foto v Příloha 3.

Anomálie B2 z metody DEMP je pouze v nejmělké proměřované hladině hlouběji již nebyla zachycena, může se tak jednat o pozůstatek pěší komunikace, která je patrná z historické ortofoto mapy z 40. let, jejíž pozůstatek je znatelný i na současných ortofoto mapách (Příloha 7). Hloubka a tvar skalního podkladu, zastižená v metodě ERT a refrakční seismiky na profilu E22, respektive S22, spolu vzájemně souhlasí.

Na schématu (Obrázek 21) je znázorněna komplexní anomálie X (součet významných anomálií metod ERT, SOP a DEMP). Do této komplexní anomálie spadá idealizovaný půdorys pohřbeného zdiva, potvrzený metodou SOP, a předpokládaný obrys nezdokumentovaných archeologických sond. Pod jižní zdí objektu, charakterizovanou nejsilnější odporovou anomálií, se táhne úzká deprese, „příkop“, potvrzený na všech seismických profilech.

Příkop vede pod zvonici směrem k objektu a mohl sloužit jako prohloubená cesta pro přístup do objektu, nebo při stavbě základů objektu, v přímém kontaktu se zdmi ovšem nelze použitými geofyzikálními postupy příkop potvrdit. Zvonice vystavěna po roce 1500 částečně přes příkop naznačuje, že v době její stavby již nebyl využíván. Poloha objektu částečně sahá pod ohradní zeď

a lze předpokládat, že zasahuje i na plochu dnešního hřbitova. Orientace objektu nejspíše odpovídala orientaci kostela, což znamená, že každá jeho stěna směřovala na jednu světovou stranu, na rozdíl od zvonice, která je vůči osám světových stran mírně natočena.



Obrázek 21: Schéma anomálií spojených metod s idealizovanými obrysy pohřbených objektů a archeologických sond

10. Závěr

Tématem diplomové práce byl geofyzikální průzkum části významné archeologické lokality v okolí kostela Stětí svatého Jana Křtitele v Dolních Chabrech. Tento průzkum byl proveden ve spolupráci s panem PhDr. M. Trymlem z odboru archeologie Národního památkového ústavu v Praze. Cílem tohoto průzkumu bylo lokalizovat a charakterizovat objekty, které byly v minulosti částečně odhaleny v archeologických sondách, případně lokalizovat jejich další průběh a nalézt další pohřbené objekty, jež se mohli na této lokalitě nacházet. Objekty které, byly hlavním cílem průzkumu, bylo pohřbené zdivo, případně její destruované zbytky a úzká deprese označována jako příkop.

Provedený geofyzikální průzkum vybraným komplexem metod, přinesl poziční informace o obou objektech, které byly předmětem průzkumu. Žádné další pohřbené objekty, o jejichž přítomnosti se dříve nevědělo, nalezeny nebyly.

Všechny metody přinesly určitý podíl vzájemně se doplňujících informací. Na základě výsledků odporových metod byla prokázána přítomnost pohřbeného zdiva. Z výsledků symetrického odporového profilování bylo možno vytvořit přehlednou mapu izolinií, díky které bylo možno lokalizovat hlavní objekt. Multielektrodotové měření následně ten objekt blíže charakterizovalo a lokalizovalo další objekty, které byly s použitou metodiku odporového profilování jen těžce identifikovatelné. I přes znečištění v nejmělké vrstvě přinesla metoda dipólového elektromagnetického profilování zajímavé výsledky. Na místě pohřbeného objektu lokalizovaného odporovými metodami, byly zaznamenány silné anomálie odpovídající vodivým předmětům. Díky metodě refrakční seismiky bylo možné zmapovat reliéf skalního podloží a byly odhaleny deprese, které rozměry a polohou odpovídaly prodloužení příkopu odhaleného v archeologických sondách.

Původní účel těchto zachycených objektů nelze geofyzikálními metodami objasnit.

Geofyzikální průzkum by bylo vhodné doplnit o metodu GPR na již proměřeném území a rozšířit území průzkumu za ohradní zeď, směrem dovnitř hřbitova s použitím komplexu metod již na této lokalitě využitých.

11. Seznam použitých zdrojů

- BEVAN, B.W. (2000), An early geophysical survey at Williamsburg, USA. *Archaeol. Prospect.*, 7: 51-58. doi:[10.1002/\(SICI\)1099-0763\(200001/03\)7:1<51::AID-ARP128>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0763(200001/03)7:1<51::AID-ARP128>3.0.CO;2-I)
- BONSALL, J, R. FRY, C. GAFFNEY, I. ARMIT, A. BECK, V. GAFFNEY. Assessment of the CMD Mini-Explorer, a New Low-frequency Multi-coil Electromagnetic Device, for Archaeological Investigations. *Archaeological Prospection* [online]. 2013, 219-231 [cit. 2020-04-05]. DOI: 10.1002/arp.1458. ISSN 10752196. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/arp.1458>
- BOURBIÉ, T. Acoustics of porous media. Paris: Editions Technip, 1987. ISBN 2710805162.
- BRADOVÁ, E. Kostel Stětí sv. Jana Křtitele v Dolních Chabrech. Praha: Občanské sdružení na ochranu památek v Dolních Chabrech, 2011. ISBN 978-80-260-0416-5.
- CLARK, A. 1996: Seeing Beneath the Soil. Prospection methods in archaeology. Routledge. London. ISBN 978-0-415-21440-7.
- EVERETT M.E. (2013): Near-surface applied geophysics. ISBN 978-1-107-01877-8.
- ERNENWEIN, E. G., M. L. HARGRAVE 2009: Archaeological Geophysics for DoD Field Use: a Guide for New and Novice Users. US. Department of Defence
- FORTE, E. a M. PIPAN. Integrated seismic tomography and ground-penetrating radar (GPR) for the high-resolution study of burial mounds (tumuli). *Journal of Archaeological Science* [online]. 2008, 2614-2623 [cit. 2019-08-12]. DOI: 10.1016/j.jas.2008.04.024. ISSN 03054403. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305440308000927>
- DAVID A., LINFORD N., LINFORD P. Geophysical survey in archaeological field evaluation., English Heritage Publishing, 2008. ISSN 10752196.
- GAFFNEY, C., GATER, J. Revealing the Buried Past: Geophysics for Archaeologists, Tempus Publishing. Stroud, 2003. ISBN 0752425560
- Gf Instruments (2019): Short guide for electromagnetic conductivity mapping and tomography, EN. Dostupné z: http://www.gfinstruments.cz/index.php?menu=gi&smenu=iem&cont=cmd1_&ear=dl
- KOVANDA J., BLATKA B., BERNARD J. H., BRUNNEROVÁ Z., BŘEZINOVÁ D., BUKOVANKSÁ M., CÍLEK V., FRIDRICHOVÁ M., HAVLÍČEK V., HOLUB V., Hrdlička L., Chlupáč I., Kadlecová R., Kachlík V., Kaprasová E., Klečka M., Král J., Kříž J., Lochmann Z., Lysenko V., Mašek J., Šalanský K., Tomášek M., Zlenka P., 2001. Neživá příroda Prahy a jejího okolí. Academia, Praha.
- KUNA, M. Nedestruktivní archeologie: Non-destructive archaeology. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1216-8.

LOCKHART, J. J., T. J. GREEN 2006: The Current and Potential Role of Archaeogeophysics in Cultural Resource Management in the United States. In: Jay K. Johnson (ed.): Remote Sensing in Archaeology. An Explicitly North American Perspective. The University of Alabama Press. Tuscaloosa, USA.

LOKE M. H. (1999): Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies: A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys. Dostupné z: www.geometrics.com/resources/.

LOKE M. H. (2018): Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. (Datum revize: 4. května 2018). [Tutorial Notes]. Dostupné z: www.geotomosoft.com/downloads.php

LOKE M. H. (2019): Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. [RES2DINV manual] Dostupné z: www.geotomosoft.com/downloads.php

LOWRIE W. (2007): Fundamentals of Geophysics. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 381 s, ISBN 978-0-521-67596-3.

MAREŠ, S. (1990): Úvod do užité geofyziky: celostátní vysokoškolská učebnice pro studující přírodovědeckou fakultu studijních oborů – geologické vědy. 2. přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury

MILSOM, J. Field geophysics. 3rd ed. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2003. ISBN 0-470-84347-0.

MOKRÁ Z. (2016): Konstrukce rychlostních řezů v seismickém průzkumu. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Praha.

MUSSET A. E., KHAN M. A. (2000): Looking into the earth: an introduction to geological geophysics. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-78085-3.

PADÍN, J., A. MARTÍN a A. B. ANQUELA. Archaeological microgravimetric prospection inside don church (Valencia, Spain). Journal of Archaeological Science [online]. 2012, 547-554 [cit. 2019-08-12]. DOI: 10.1016/j.jas.2011.10.012. ISSN 03054403. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305440311003712>

RASHED, M. A. (2017) Archaeology and Geophysics: Invincible Couple. Archaeology & Anthropology: Open Access [online]. [cit. 2019-08-12]. DOI: 10.31031/AAOA.2017.01.000514. ISSN 25771949. Dostupné z: <http://crimsonpublishers.com/aaoa/fulltext/AAOA.000514.php>

SANDMEIER K. J. (2019) ReflexW manual, version 9.0, dostupné z: www.sandmeier-geo.de/download.html

SCHMIDT, A. „Should They Be Prescriptive?” Eac Guidelines for the Use of Geophysics in Archaeology Questions to Ask and Points to Consider, *Archaeolingua*, 2015, pp. 23–34.

ŠIROKÝ J. (2014): Možnosti ERT a GPR pro analýzu polygonálních kryogenních struktur. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Praha.

ŠÍDOVÁ K. (2016): Mineralogický a petrografický výzkum opuk z různých stavebních fází kostela Stětí sv. Jana Křtitele v Dolních Chabrech. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, přírodovědecká fakulta, Praha.

ŠTOREK D. (1993): Inženýrskogeologická mapa mocností kvartérního pokryvu 1:5000, klad listu Kralupy nad Vltavou 6-8, K+K Průzkum s.r.o. (online). Dostupné z: http://app.iprpraha.cz/apl/app/ig_mapy/

ŠTOREK D. (1993): Inženýrskogeologická mapa geologických poměrů 1:5000, klad listu Kralupy nad Vltavou 6-8, K+K Průzkum s.r.o. (online). Dostupné z: http://app.iprpraha.cz/apl/app/ig_mapy/

TELFORD W. M., GELDART L. P., SHERIFF R. E. (1990): *Applied Geophysics*, Second Edition. New York: Cambridge University Press, ISBN 0-521-32693-1.

TRYML M., JEČNÝ H., (1977): Praha 8 - Dolní Chabry. Pražský sborník historický X. Nakladatelství Orbis, Praha, str. 216–218.

Internetové zdroje

Česká geologická služba – geologická mapa 1:50 000 (online). [cit. 2019_08_05]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>

Česká geologická služba – mapa vrtné prozkoumanosti (online). [cit. 2020_03_02]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/vrtna_prozkoumanost/

Geoportal hl. m. Prahy, 2020 – Otevřená data, vrstevnicová mapa 1 m Dolní Chabry (online). [cit. 2019_07_25]. Dostupné z: <http://www.geoportalpraha.cz/cs/opendata/2B7AB7CF-A6B0-4AB8-BB2B-229AC168605C>

Geoportal hl. m Prahy, 2020 – Archiv leteckých snímků (online). [cit. 2020_02_07] Dostupné z: <http://app.iprpraha.cz/apl/app/ortofoto-archiv/>

Geoportal hl. m. Prahy, 2020 – Digitální technická mapa Prahy (online). [cit. 2020_02_07]. Dostupné z: <http://app.iprpraha.cz/apl/app/dtmp/index.html>

Turistická mapa Prahy, 2020. © Seznam.cz, a.s. Dostupné z: <http://mapy.cz>

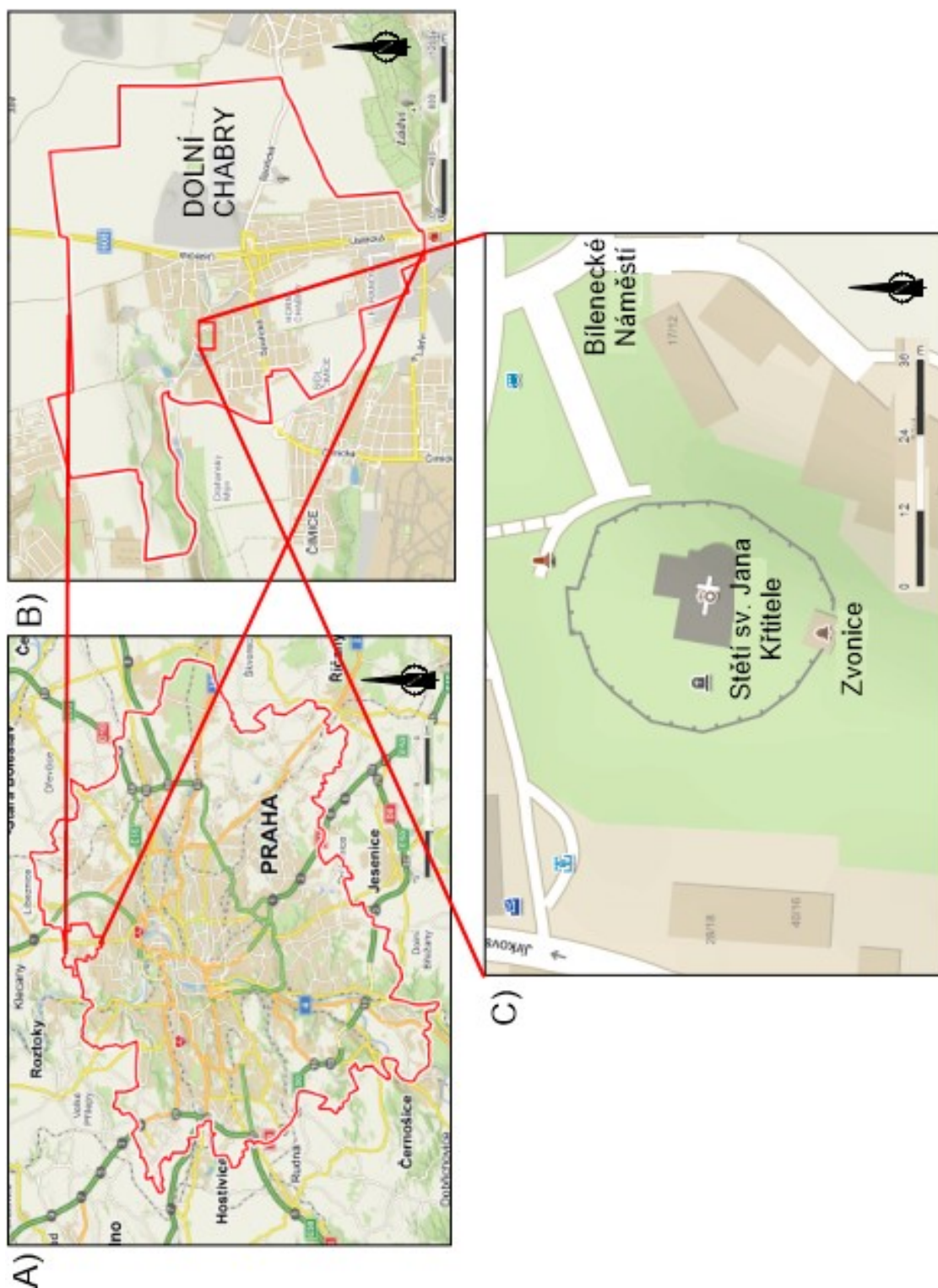
Použitý software

Surfer 13, ver. 13.6.618 (64 bit), Golden Software, LLC, 2015 <https://www.goldensoftware.com/>

Res2dinv, 2D resistivity and IP inversion, ver. 3.54.44, Geotomo Software, Malaysia, 2004
<https://www.geotomosoft.com/>

ReflexW, ver. 8.5.8, Sandmeier geophysical research, 2017, <https://www.sandmeier-geo.de/>

12. Přílohy



Příloha 1: Polohová situace kostela C) a obce B) v Praze A) (Zdroj: <http://mapy.cz>)



0m 50m 100m 150m

Horniny předkvartérního (skalního) podkladu
starší paleozoikum - svrchní proterozoikum



kvarcdiorit, amfibolický
diorit až gabrodiorit

svrchní proterozoikum



droby, prachovce, břidlice
místně svrchu fosilně zvětralé

Hranice hornin skalního podkladu



převážně neověřené



archeologicky významná lokalita

Zeminy pokryvných útvarů

IV	VI	X	>
IV	VI	X	>
IV	VI	X	>

písčito-jílovité náplavy
s nižším podílem štěrku
holocénní, fluviální sedimenty

písčito-jílovité hlíny s úlomky
křídových hornin a s valouny
štěrků
deluviální sedimenty

spraše a sprašové hlíny s
nízkým podílem drobného štěrčku
eolické sedimenty

2 4 6 10 a více metrů

Hranice zemín pokryvných útvarů



na povrchu (v první vrstvě)

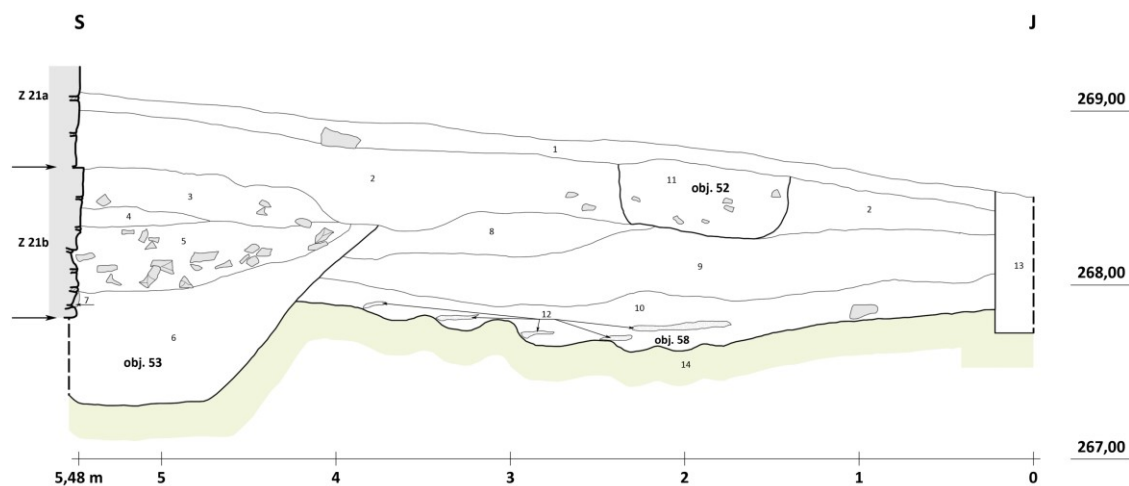


ve druhé vrstvě pod povrchem

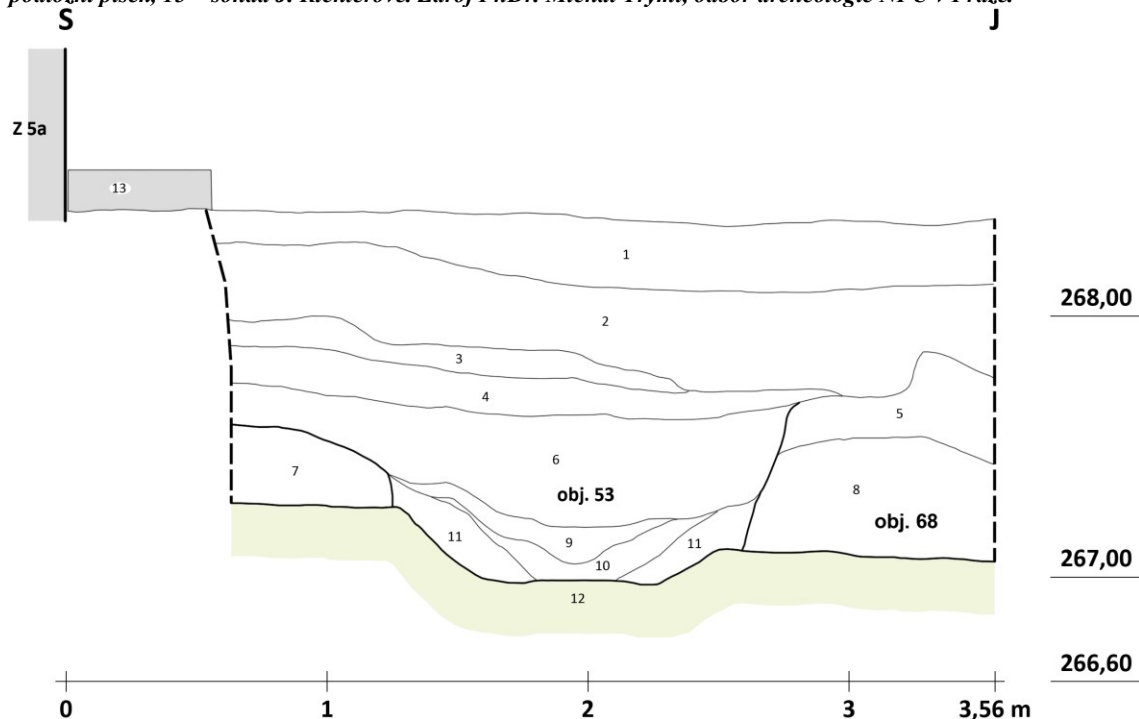
Příloha 2: Inženýrskogeologická mapa geologických útvarů 1:5000 s legendou (Zdroj Štorek D. 1993, upraveno)



Příloha 3: Negativy označené III 7, VIII 7, VI 3, VII 1 a v_3_1_109 archeologických sond, v červených kolečkách 3 kovové tyče pravděpodobně způsobující anomálie v metodě DEMP, zdroj: PhDr. Michal Tryml, odbor archeologie NPÚ v Praze.

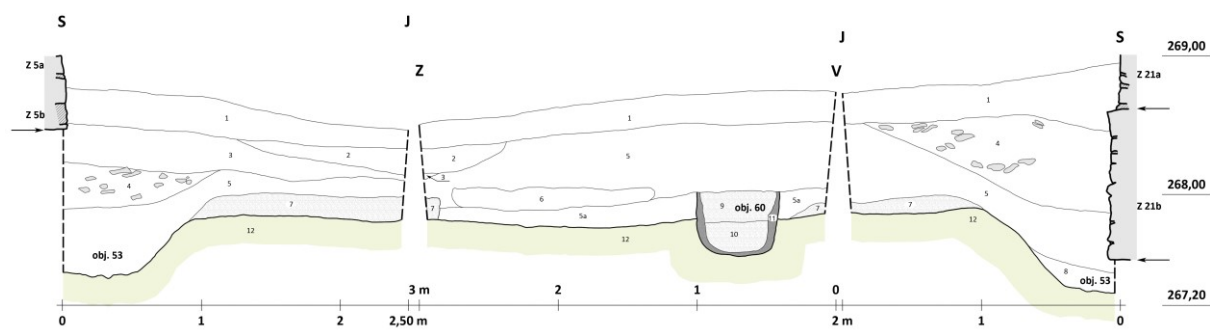


Příloha 4: Archeologická sonda XX s přepisem popisu – východní profil. Popis vrstev: 1 – humus, 2 – hnědošedá hlinitopísčítá s kaménky, 3 – středně hnědá hlinitá, 4 – rezavě hnědá hlinitá s kaménky a maltou, 5 – červenavě hnědá hlinito-jílovitá s kaménky a maltou, 6 – hnědošedá písčítá s kaménky, 7 – světle okrový jíl (pojivo zdiva), 8 – okrově hnědá hlinitá, 9 – rezavě hnědá hlinitá, 10 – šedočerná hlinitá, 11 – okrová jílovitá s kaménky a maltou, 12 – žlutozelený podložní písek, 13 – sonda J. Richterové. Zdroj PhDr. Michal Tryml, odbor archeologie NPÚ v Praze.



Příloha 5: Archeologická sonda XXV s přepisem popisu – profil 1 (západní). Popis vrstev: 1 – zbytky hromady z minulých sond, 2 – drn, 3 – šedě okrová písčito-hlinitá se zlomky opuky a maltou, 4 – středně hnědá hlinitá, drobná, kamenitá, 5 – šedě hnědá hlinitá, slabá příměs kaménků a malty, 6 – zeleno hnědá, jílovito písčítá, kaménky, 7 – sypká žlutohnědá hlinitá, 8 – středně hnědá, hlinitá, mramorovaná zrnky podloží, 9 – zelenohnědá hlinitopísčítá, 10 – zelenohnědá hrubá písčítá se zrnky podloží a vápna, 11 – zelené skalnaté podloží.

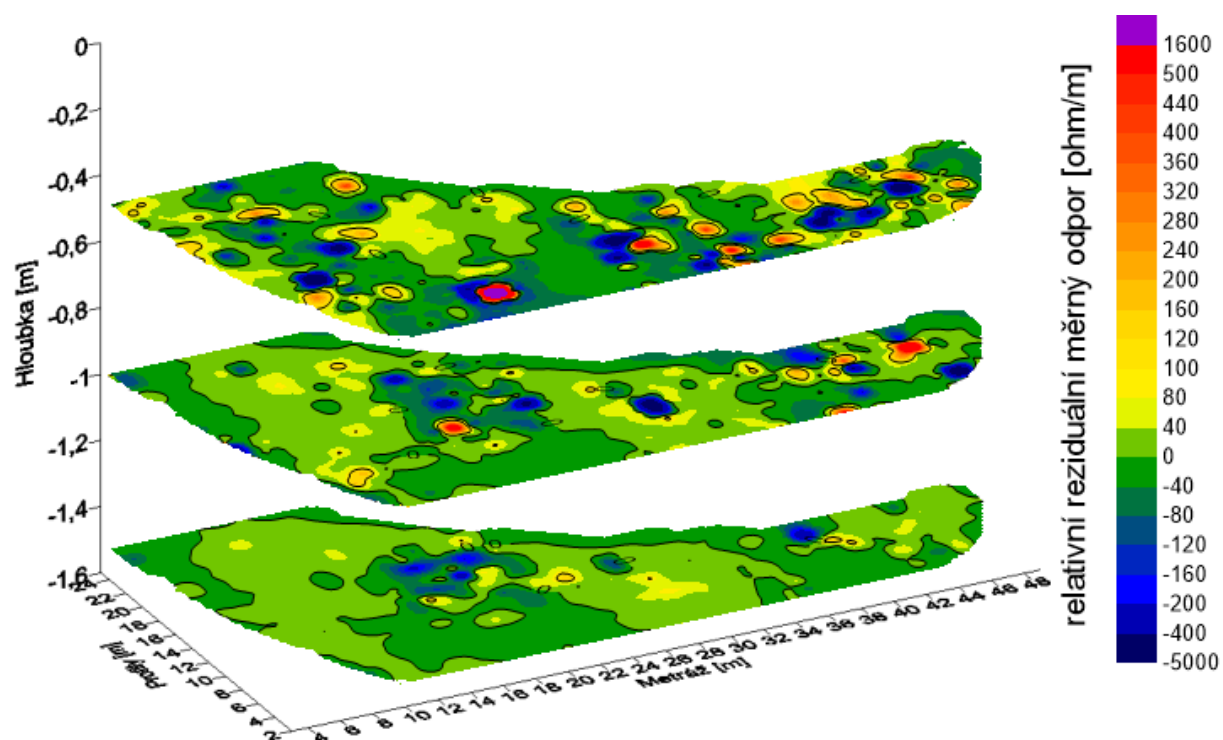
Sonda XXV, profil 2 (východní). Popis vrstev: 1 – drn, 2 – šedě okrová písčito-hlinitá se zlomky opuky, 3 – okrový jíl s opukovou drtí a maltou, 4 – středně hnědá hlinitá, kamenitá, 5 – tmavě hnědá hlinitá, slabá příměs kaménků a malty, 6 – zeleno hnědá, jílovito písčítá, kaménky, 7 – kompaktní žlutohnědá hlinitá, 8 – středně hnědá, mramorovaná zrnky podloží, 9 – okrová, hlinitojílovitá, místě propálená do červena, 10 – červeno hnědá, hlinitá, 11 – středně hnědá kompaktní, zrna podložní skály, 12 – zelené skalnaté podloží, 13 – beton. Zdroj PhDr. Michal Tryml, odbor archeologie NPÚ v Praze.



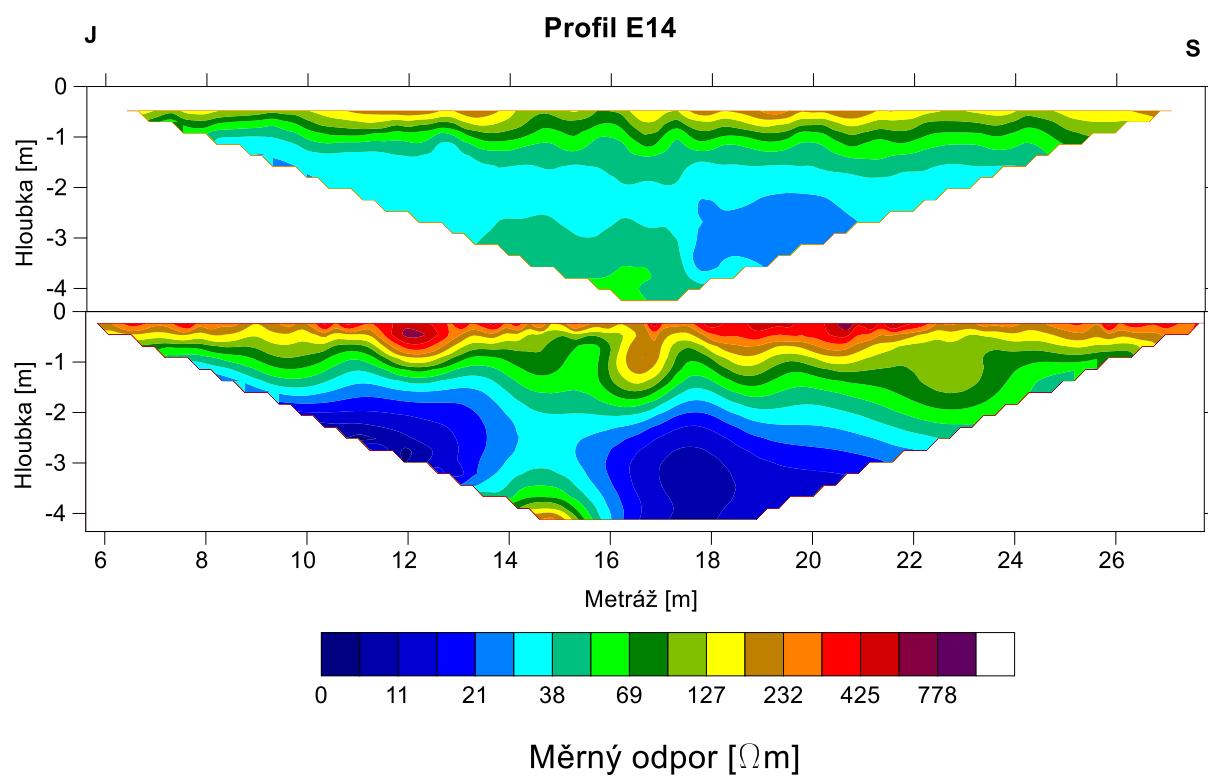
Příloha 6: Archeologická sonda XXII s přepisem terénního popisu – řezu v sondě. Popis vrstev: 1 – humus, 2 – okrová jílovitohlinitá, 3 – světlejší okrová hlinitá, 4 – hnědočervená hlinitá s kameny, 5 – hnědá hlinitopísčítá s kaménky, 5a – hnědá hlinitopísčítá bez kaménků, 6 – opuková drť, 7 – hnědě probarvený hrubý písek, 8 – zelenohnědá hlinitopísčítá, 9 – zeleno okrová písčítá, 10 – zelenohnědá písčítá, 11 – červenočerná písčítá přepálená, 12 – zvětralé podloží. Zdroj PhDr. Michal Tryml, odbor archeologie NPÚ v Praze.



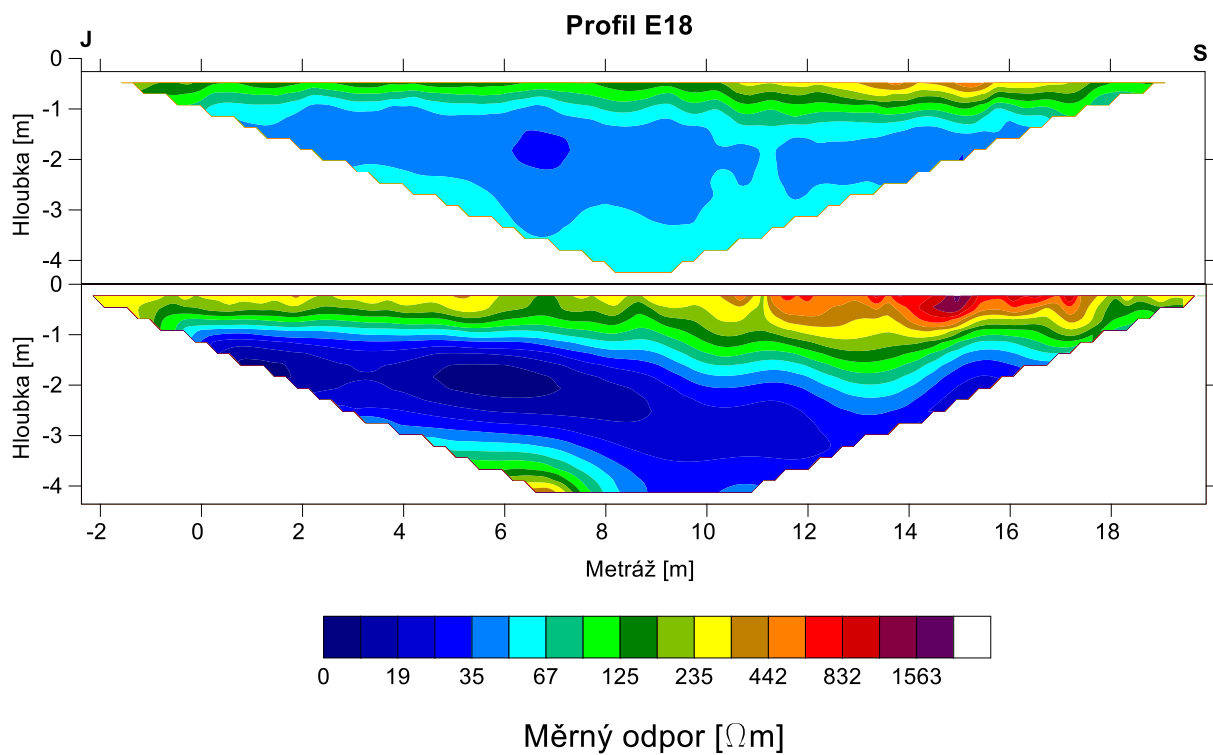
Příloha 7: Porovnání leteckých snímků z roku 1945 a roku 2019 s vyznačenými cestami kolem hřbitova (červené šipky), zdroj: Geoportal hl. m. Prahy.



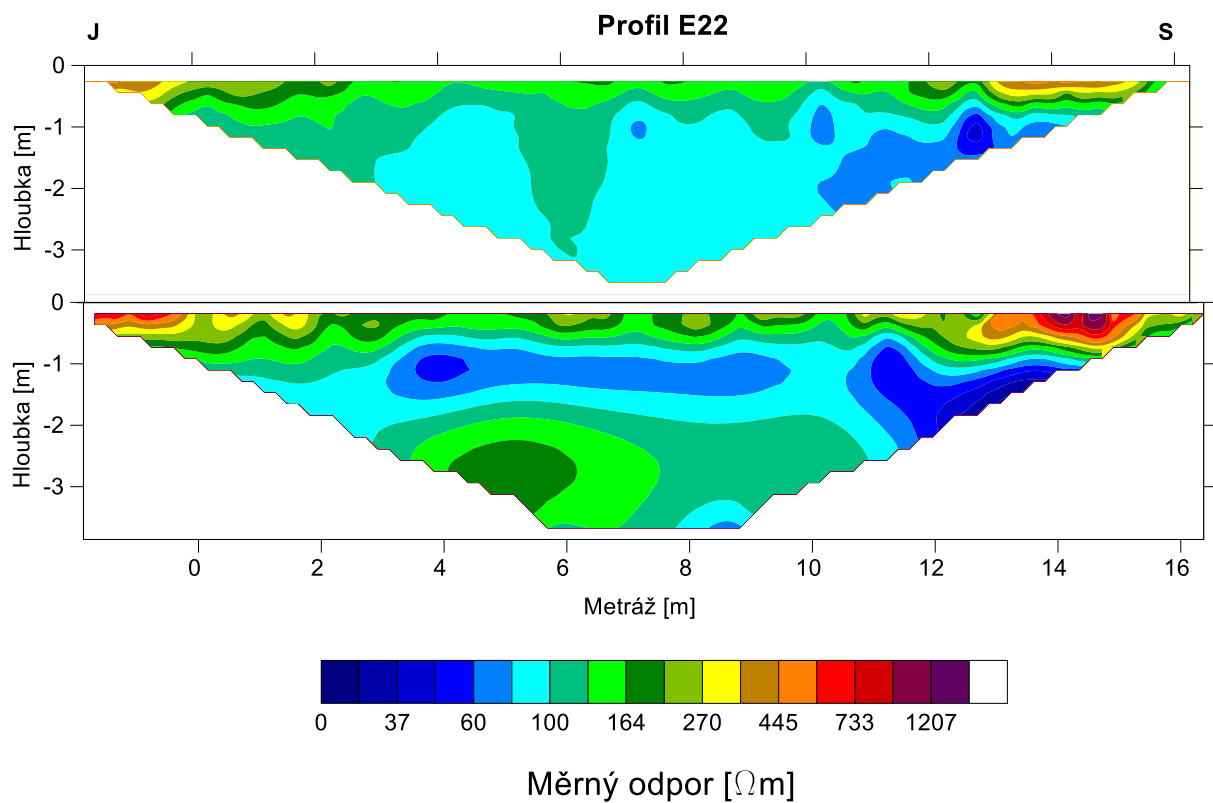
Příloha 8: Mapa reziduálních relativních odporů, v odpovídajících hloubkách, metoda DEMP. 20x převýšeno.



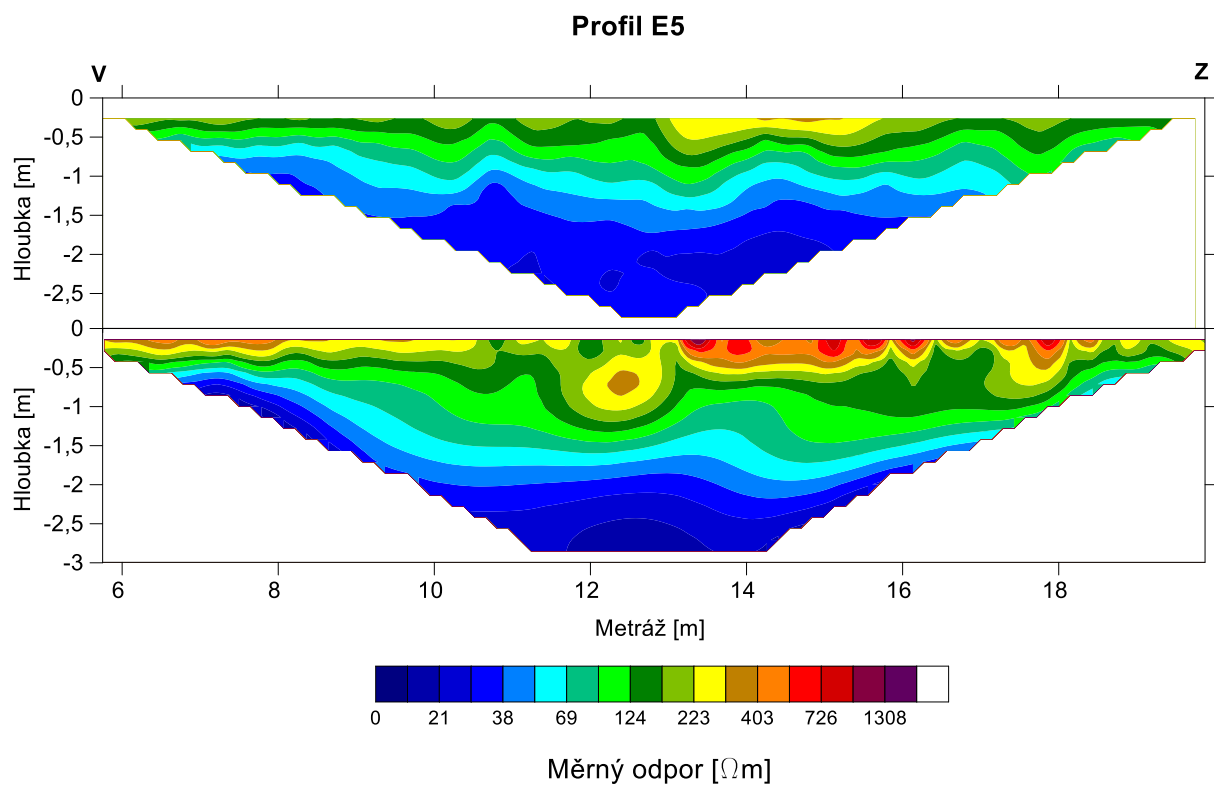
Příloha 9: Metoda ERT, naměřená data (nahore) a 2D invertovaný řez odporový (dole), profil E14



Příloha 10 Metoda ERT, naměřená data (nahore) a 2D invertovaný odporový řez (dole), profil E18



Příloha 11 Metoda ERT, naměřená data (nahore) a 2D invertovaný odporový řez (dole), profil E22



Příloha 12: Metoda ERT, naměřená data (nahore) a 2D invertovaný odporový řez (dole), profil E5